

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Josip Štivić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Josip Štivić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru Doc. dr. sc. Goranu Šagiju na pomoći tijekom izrade rada, korisnim savjetima te ustupljenoj literaturi. Također se zahvaljujem obitelji i supruzi na strpljenju i podršci tijekom studiranja.

Josip Štivić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Josip Štivić**

Mat. br.: 0035187044

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza ponašanja vozila s prikolicom u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of vehicle-trailer combination behaviour in a test procedure with lateral excitation**

Opis zadatka:

Programski paketi za analizu dinamike vozila omogućuju simuliranje uvjeta stvarne vožnje u virtualnom okruženju i promjenu parametara s ciljem pronalaženja željenog ponašanja vozila. Cilj ovog rada je razmotriti utjecaj osnovnih parametara vozila, prikolice i okolišnih uvjeta na ponašanje vozila s prikolicom u ispitnim procedurama koje se odnose na analizu stabilnosti, a prvenstveno u ispitnim procedurama s bočnom pobudom.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

- Napraviti pregled standardnih ispitnih procedura koje se odnose na stabilnost vozila.
- Prikazati primjere (iz literature) simulacijskih modela vozila s prikolicom za analizu dinamike u ispitnim procedurama vezanim za stabilnost te navesti podatke o složenosti numeričkih modela, podatke o potrebnim parametrima za zadavanje modela i podatke o mogućnostima tih simulacijskih modela.
- Na osnovu dostupne literature odrediti koji su najznačajniji parametri koji utječu na stabilnost vozila s prikolicom, a čiji će se utjecaj na ponašanje vozila analizirati u simulacijama.
- Napraviti pregled dinamičkih karakteristika koje služe za ocjenu ponašanja vozila s prikolicom.
- Izraditi odgovarajuće modele vozila, prikolica i ispitnih procedura u programskom paketu CarSim® te simulirati nekoliko ispitnih procedura vezanih za analizu stabilnosti.
- Prikazati rezultate simulacija, provesti detaljnu analizu rezultata te donijeti zaključke o utjecaju najznačajnijih parametara na stabilnost vozila s prikolicom.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskog rada. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

3. svibnja 2018.

Datum predaje rada:

5. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:

11., 12. i 13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	1
SUMMARY .....	2
1. UVOD.....	3
1.1. Dinamika vozila .....	3
1.2. Bočna pobuda na vozilo .....	4
1.3. Konstrukcija prikolice.....	4
1.4. Standardne ispitne procedure .....	5
1.5. Ispitivanja u otvorenoj i zatvorenoj petlji .....	6
2. Ponašanje vozila s prikolicom u vožnji .....	8
2.1. Sile na vozilu.....	8
2.1.1. Vučna sila.....	8
2.1.2. Bočne sile na vozilu .....	9
2.2. Konstrukcija prikolice.....	15
3. Ponašanje vozila s prikolicom i simulacijski modeli.....	18
3.1. Jednostavni modeli.....	18
3.2. Složeni modeli.....	18
3.2.1. Simulacijski model u xy ravnini .....	19
3.3. Eksperimentalna analiza i potvrda podataka.....	21
3.4. Konstrukcijska rješenja suzbijanja problema gubitka stabilnosti vozila s prikolicom	23
3.4.1. Naletna kočnica.....	23
3.4.2. Trailer stability assist (TSA).....	24
3.4.3. IDC Intelligent drive control.....	25
3.4.4. Sensabrake EAS.....	26
4. Standardne ispitne procedure.....	27
4.1. Putnička vozila – Osobno vozilo s prikolicom – Ispitivanje bočne stabilnosti ISO 9815:2003 .....	27
4.1.1. Varijable i simboli.....	27
4.1.2. Uvjeti ispitivanja .....	28
4.1.3. Zahtjevi na postavljanje tereta na prikolicu i vozilo .....	28
4.1.4. Princip ispitivanja .....	30
4.1.5. Analiza podataka.....	32
4.1.6. Rezultati ispitivanja .....	34
4.2. Osjetljivost na bočne udare vjetra ISO 12021-1996 (2010) .....	34
4.2.1. Princip testiranja .....	34
4.2.2. Varijable.....	35
4.2.3. Oprema za mjerenje .....	35

4.2.4.	Testni uvjeti .....	36
4.2.5.	Vozilo u ispitnoj proceduri .....	37
4.2.6.	Ispitna procedura.....	37
4.2.7.	Analiza podataka.....	38
5.	Simulacija u programskom paketu CarSim .....	40
5.1.	Model vozila .....	41
5.2.	Model prikolice .....	41
5.3.	Opis ispitne procedure u CarSim-u .....	42
5.3.1.	Kružna ispitna procedura za podupravljanje vozila prema normi ISO 4138 Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods .....	43
5.3.2.	Ispitna porcedura s impulsnom pobudom na vučnom vozilu prema (4.1).....	44
5.3.3.	Ispitna procedura s bočnom pobudom vjetra .....	45
5.4.	Utjecaj parametara prikolice i parametara ispitne procedure na rezultate ispitivanja	47
5.4.1.	Utjecaj mase tereta na prikolici.....	48
5.4.2.	Utjecaj položaj težišta tereta na prikolici u smjeru osi x .....	51
5.4.3.	Utjecaj položaja tereta u smjeru osi y .....	55
5.4.4.	Utjecaj širine traga kotača na prikolici .....	56
5.4.5.	Utjecaj bočne površine na ispitnu proceduru s bočnom pobudom vjetra .....	58
5.4.6.	Utjecaj brzine vožnje na stabilnost vozila s prikolicom .....	59
5.4.7.	Utjecaj faktora trenja prijanjanja.....	61
5.4.8.	Utjecaj kuta pod kojim vjetar udara na vozilo .....	64
5.4.9.	Utjecaj brzine vjetra .....	65
5.4.10.	Utjecaj položaja tereta na poligonu za ispitivanje podupravljlivosti vozila .....	67
5.4.11.	Utjecaj širine traga kotača na poligonu za ispitivanje podupravljlivosti vozila...	69
5.4.12.	Utjecaj mase tereta na poligonu za ispitivanje podupravljlivosti vozila.....	69
5.4.13.	Utjecaj mase tereta u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu.....	71
5.4.14.	Utjecaj položaja tereta u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu.....	73
5.4.15.	Utjecaj brzine vožnje u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu.....	74
5.4.16.	Utjecaj širine traga kotača u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu.....	76
5.5.	Usporedba rezultata.....	77
6.	ZAKLJUČAK.....	79
	LITERATURA.....	80
	PRILOZI.....	82

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Slie i momenti na vozilo [1].....	3
Slika 2. Bočna sila, kut udara vjetra, kut bočnog klizanja vozila [5].....	4
Slika 3. Otvorena i zatvorena petlja [5].....	7
Slika 4. Ispitivanje u otvorenoj petlji [8].....	7
Slika 5. Elipsa krug trenja [2].....	9
Slika 6. Gubitak stabilnosti uslijed bočne sile [5].....	10
Slika 7. Prevratanje vozila uslijed gubitka stabilnosti [27].....	10
Slika 8. Bočne sile na kotaču [2].....	10
Slika 9. Čeona površina vozila [2] .....	12
Slika 10. Posljedice bočnih sila [5] .....	12
Slika 11. c) Zračni tunel, b) Generator vjetra, a) prirodni vjetar [5].....	13
Slika 12. Dijelovi vozila koji utječu na turbulentno strujanje zraka oko vozila [1].....	14
Slika 13. Osnovne veličine na vozilu glede bočnog udara vjetra[3] .....	15
Slika 14. Šasija prikolice s označnim komponentama [11] .....	16
Slika 15. Priključna spojka i auto kuka [13] .....	16
Slika 16. Prikolica jednoosovinska sa zatvorenim tovarnim prostorom [12] .....	17
Slika 17. Model vozila s prikolicom plus pojednostavljeni model [6].....	18
Slika 19. Pojednostavljeni model vozila i prikolice s jednim tragom kotača[16].....	19
Slika 20. koeficijent prigušenja za pravilno i nepravilno opterećenu prikolicu [16] .....	21
Slika 21. Uređaj za mjerenje kuta između vučnog vozila i prikolice [16] .....	22
Slika 22. Rezultati mjerenja (uzdužna brzina , bočna brzina, kut zakreta upravljača , kut između vozila i prikloce) [16] .....	22
Slika 23. Sustav naletne kočnice [14] .....	24
Slika 24 . Trailer stability assist način rada [25] .....	25
Slika 25. IDC elektro mehanički sustav prikolice [17] .....	25
Slika 26. AL-KO Sensabrake kit za montažu sustava kočenja prikolice [26] .....	26
Slika 27. Mehanizam za raspodjelu tereta na vučnoj kuki[23] .....	29
Slika 28. Odaziv prikolice i vozila na impuls upravljača [28] .....	31
Slika 29. Odaziv vozila i prikolice na zakret upravljača [28] .....	32
Slika 30. Brzina zakreta vozila i prikolice oko z osi [28] .....	33
Slika 31. Ispitna staza [15] .....	36
Slika 32. Oscilacija i vršna vrijednost [15] .....	38
Slika 33 . Glavno korisničko sučelje programskog paketa, CarSim .....	40
Slika 34. Terensko motorno vozilo s otvorenim tovarnim prostorom, CarSim .....	41
Slika 35. Prikolica sa zatvorenim tovarnim prostorom, CarSim.....	42
Slika 36. Model vozila s prikolicom korišten u simulaciji, CarSim .....	42
Slika 37. Promjena kuta bočnog klizanja u odnosu na brzinu vozila [24] .....	43
Slika 38 . Kružna staza, CarSim.....	44
Slika 39. Primjer izbornika u kojem se zadaje impuls zakreta upravljača, CarSim.....	45
Slika 40. Prikaz ispitne procedure te parametara staze, CarSim .....	45
Slika 41. Pozicija generatora vjetra, CarSim.....	46
Slika 42. Skica vozila u pokretu sa bočnom pobudom vjetrom [5] .....	46
Slika 43. Stvarni generatori vjetra koji se koriste u realnim ispitivanjima vozila u ovoj ispitnoj proceduri [2] .....	47
Slika 44. Masa tereta, CarSim .....	48
Slika 45. Intenzitet vjetra na generatorima vjetra .....	49
Slika 46. Utjecaj različitih masa tereta na kut zakreta upravljača vozila u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim.....	50

Slika 47. Utjecaj mase na bočni pomak vozila s prikolicom u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim.....	50
Slika 48. Kutna brzina vozila i prikolice (teret 1000kg) u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim.....	51
Slika 49. Položaj tereta 1 na prikolici u smjeru $x$ osi, CarSim.....	52
Slika 50. položaj osovina prikolice u odnosu na kuku vozila, CarSim.....	52
Slika 51. Utjecaj položaja tereta na prikolici – pomak od zadane putanje, CarSim .....	53
Slika 52. Zakret upravljača za različite položaje tereta, CarSim.....	53
Slika 53. Zakret vozila i prikolice uslijed udara bočnog vjetra [19] .....	54
Slika 54. Kut zakreta vozila oko osi $z$ ( $yaw$ ), CarSim.....	55
Slika 55. Utjecaj položaja tereta, u smjeru $y$ osi, na pomak u odnosu na zadanu putanju, CarSim.....	56
Slika 56. Utjecaj položaja tereta u smjeru $y$ osi, na kut zakreta oko $x$ osi, CarSim .....	56
Slika 71. Zakret oko $z$ osi - utjecaj širine kotača.....	57
Slika 72. Zakret oko $x$ osi - utjecaj širine kotača ( $Roll$ ) .....	57
Slika 73. Utjecaj bočne površine prikolice na odstupanje vozila od zadane putanje, prilikom udara bočnog vjetra, CarSim .....	58
Slika 74. Utjecaj bočne površine prikolice na kut zakreta upravljača prilikom bočnog udara vjetra, CarSim.....	58
Slika 57. Vozilo s različitim brzinama vožnje, CarSim .....	59
Slika 58. Bočni pomak vozila od zadane putanje za različite brzine vožnje, CarSim .....	60
Slika 59. Bočni pomak vozila od zadane putanje bez brzine $V_4$ , CarSim.....	61
Slika 60. Utjecaj brzine vožnje na bočno ubrzanje prilikom bočnog udara vjetra za 60 km/h i 80 km/h, CarSim.....	61
Slika 61. Utjecaj faktora trenja na bočni pomak vozila od zadane putanje .....	62
Slika 62. Odnos faktora trenja i bočnog pomaka usporedba rezultata .....	62
Slika 63. Utjecaj faktora trenja podloge na bočni pomak od zadane putanje (bez leda), CarSim .....	63
Slika 64. Utjecaj faktora trenja na bočno ubrzanje vozila i prikolice, CarSim .....	63
Slika 65. Poligon s generatorima vjetra pod kutem $45^\circ$ , CarSim.....	64
Slika 66. Utjecaj kuta pod kojim vjetar udara na vozilo, CarSim .....	65
Slika 68. Različite brzine vjetra prilikom udara na vozilo .....	66
Slika 69. Pomak od zadane putanje - utjecaj brzine vjetra.....	66
Slika 70 Zakret oko vertikalne osi u ravni $xy$ za različite brzine vjetra.....	67
Slika 75 . Utjecaj rasporeda tereta u smjeru osi $x$ , na kut zakreta upravljača, CarSim .....	68
Slika 76. Utjecaj položaja tereta na kut bočnog klizanja vozila i prikolice, CarSim .....	68
Slika 77. Zakret upravljača - utjecaj širine kotača na podupravljanje .....	69
Slika 78. Utjecaj mase tereta na kut bočnog klizanja vozila, izuze mase 3000kg, CarSim .....	70
Slika 79. Utjecaj mase tereta na pomak u odnosu na zadanu putanju vozila, CarSim.....	70
Slika 80. Zadavanje impulsa upravljača vučnog vozila, CarSim.....	71
Slika 81. Kutna brzina oko $z$ osi za različit iznos mase tereta na prikolici, CarSim .....	72
Slika 82. Bočno ubrzanje za različite iznose mase tereta, CarSim .....	72
Slika 83. Bočno ubrzanje za različite mase tereta, CarSim.....	73
Slika 84. Zadani kut upravljača vučnog vozila, CarSim .....	73
Slika 85. Utjecaj položaja tereta na prikolici na ispitnu proceduru s impulsnim zakretom upravljača, CarSim .....	74
Slika 86. Kut zakreta zadan za različite položaje tereta, CarSim.....	74
Slika 87. Bočno ubrzanje za različite brzine vožnje, CarSim .....	75
Slika 88. Kut zakreta upravljača za različite brzine vožnje, CarSim .....	75



---

Slika 89. Utjecaj širine traga kotača na stabilnost u ispitnoj proceduri s impulsnom pobudom upravljača vozila, CarSim .....	76
Slika 90. Utjecaj širine traga kotača na kut zakreta oko $x$ osi, CarSim.....	77

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba rezultata [16] .....	23
Tablica 2. Mjerene vrijednosti i dopuštene greške [15] .....	35
Tablica 3. Usporedba rezultata .....	77

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_b$	N	Bočna sila
$F_{T,b}$	N	Bočna sila trenja
$\mu_b$	-	Faktor trenja prijanjanja u bočnom smjeru
$G_a$	N	Adhezivna težina vozila
$\rho_z$	Kg/m <sup>3</sup>	Gustoća zraka
$v$	m/s	Brzina vozila
$v_0$	m/s	Brzina protuvjetra
$A$	m <sup>2</sup>	Čeona površina vozila
$C_w$	-	Faktor kod bočne sile udara vjetra
$F_y$	N	Bočna sila uslijed udara vjetra
$M_y$	Nm	Moment uslijed udara vjetra
$v_{rel}$	m/s	Brzina bočnog vjetra
$H$	m	Visina vozila
$C_{Fy}$	-	Faktor kod bočne sile udara vjetra koji uzima u obzir kut pod kojim vjetar udara u vozilo
$C_{My}$	-	Faktor kod momenta koji nastaje uslijed udara vjetra, a uzima u obzir kut pod kojim vjetar udara u vozilo
$L_{cp}$	m	Udaljenost težišta vozila i težišta udara vjetra
$\omega_d$	1/s	Frekvencija prigušenja
$\zeta$	-	Koeficijent prigušenja
$t$	s	Vrijeme amplitude
$\omega_0$	1/s	Frekvencija neprigušene oscilacije
$\omega_0$	N/mm	Koeficijent opruge
$c$	1/s	Koeficijent prigušenja
$\dot{\psi}$	°/s	Kutna brzina zakretanja vozila oko z osi ( <i>Yaw</i> )
$a_y$	m/s <sup>2</sup>	Bočno ubrzanje
$\delta_H$	°	Kut zakreta upravljača
$v_x$	m/s	Uzdužna brzina
$y$	mm	Pomak od pravocrtne linije
$\varphi$	°	Kut zakreta oko x osi ( <i>Roll</i> )
$\beta$	°	Kut bočnog klizanja vozila
$v_y$	m/s	Bočna brzina
$x_{40}$	m	Mjerna točka na udaljenosti 40 m od zone vjetra
$x_{20}$	m	Mjerna točka na udaljenosti 20 m od zone vjetra
$x_0$	-	Početak zone vjetra
$x_d$	m	Udaljenost jednaka 2 s vožnje testnom brzinom nakon početka zone vjetra
$x$	s	Vrijeme
$y$	%	Odazivna vrijednost

$t$	s	Vrijeme
$F_R$	N	Rezultantna sila
$\mu$	-	Faktor trenja podloge
$F_N$	N	Reakcija podloge
$F_b$	N	Bočna sila
$F_v$	N	Vučna sila

## **SAŽETAK**

Vozila s prikolicom danas su čest sudionik u prometu te je stoga važno osigurati sigurno i efikasno sudjelovanje u prometu takvog vozila. Jedan od značajnih pobudnih faktora na stabilnost same prikolice jest bočna pobuda na prikolicu. Izvor bočne pobude može biti npr. bočni udar vjetra, djelovanje centrifugalne sile u vožnji zavojem, zakret volana, poprečni nagib podloge i sl. Ona uzrokuje smetnje u stabilnosti kako prikolice tako i vučnog vozila te može dovesti do gubitka stabilnosti prikolice i vozila. Ovim radom, korištenjem simulacija i teorijski potkrijepljenim podacima prikazani su utjecajni faktori na stabilnost vozila tijekom bočne pobude. Prikazani su najutjecajniji parametri koji utječu na stabilnost vozila, a naglasak je bio na parametrima prikolice. Utjecaj parametara analiziran je u nekoliko karakterističnih ispitnih procedura kojima se u stvarnim uvjetima ispituju takva vozila, a koje su definirane na temelju literature i pravilnika.

Ključne riječi: bočna pobuda, udar vjetra, impuls zakreta upravljača

---

**SUMMARY**

Today it is often to see vehicle towing a trailer, and because of that it is important to ensure safe and efficient participation in the traffic of such a vehicle combination. One of the major impacts on the stability of the trailer itself is the lateral thrust of the trailer. The cause of the lateral thrust may be, for example, the side impact of the wind, the action of the centrifugal force while driving thru corners, the steering wheel rotation, the transverse inclination of the road, etc. It causes disturbance in stability of trailer and towing vehicle, and can lead to loss of stability of the trailer and the towing vehicle. Using simulations and theoretically substantiated data, factors influencing vehicle stability, during the lateral boost, are shown in this thesis. The most influential parameters that affect the stability of the towing vehicle and trailer are presented, with accent on the parameters of the trailer. With the help of literature, there is described real life procedures witch are used for vehicle testing in such conditions.

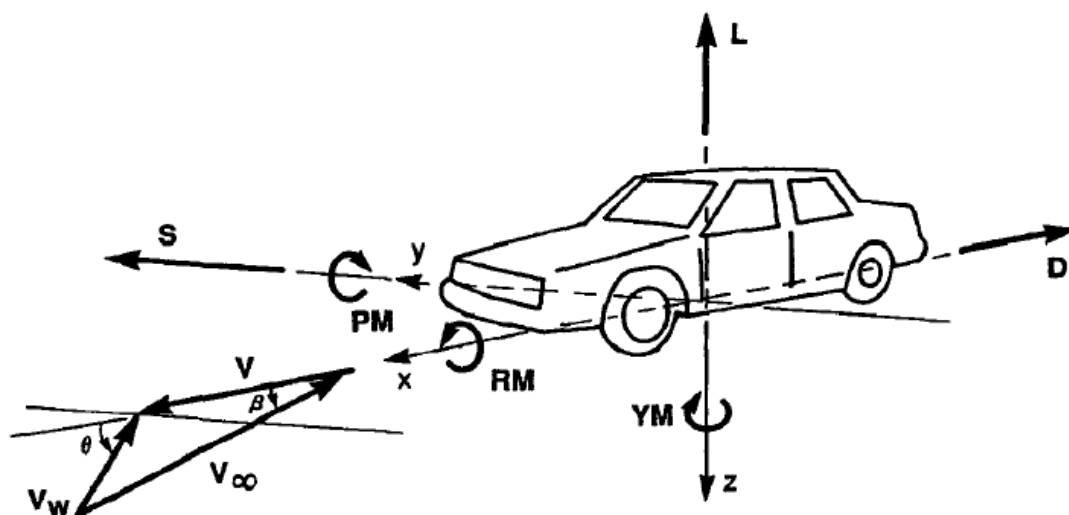
Keywords: lateral excitation, wind gust, steering impulse

## 1. UVOD

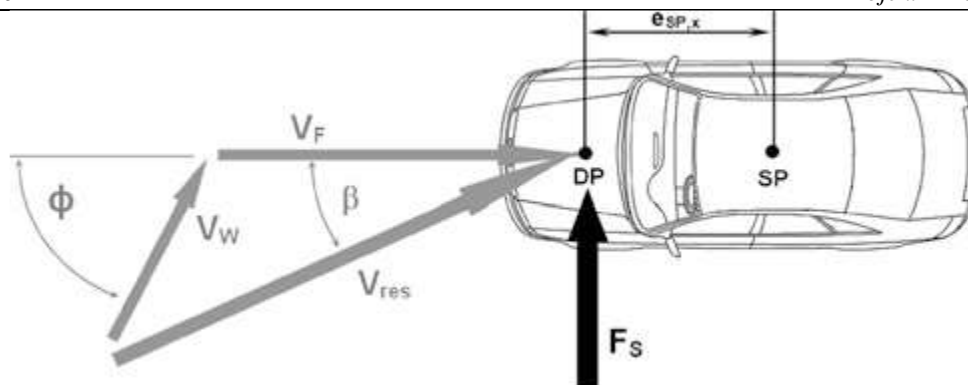
Vozilo koje vuče prikolicu u uvjetima vožnje s bočnom pobudom u određenim uvjetima može imati probleme vezano za stabilnost vozila. Bočna pobuda uzrokuje translacijske pomake vučnog vozila i prikolice, ali također uzrokuje i zakrete vozila i prikolice oko vertikalne osi. Da bi se vozilo zadržalo u zoni stabilnosti potrebno je pravilno podesiti parametre prikolice i vozila. U ovom radu naglasak je na parametre prikolice koji utječu na stabilnost vozila, ali su također razmatrani i parametri brzine vjetra, smjer vjetra, brzina vožnje, itd. Također je razmatrano vozilo s prikolicom u proceduri prolaska kroz zavoj u kojem ga centrifugalna sila nastoji izbaciti iz putanje. Neki od razmatranih parametara prikolice su položaj težišta prikolice, položaj težišta tereta, raspored tereta, površina plohe na koju udara vjetar, itd. Svi ovi parametri važni su kod stabilnosti prikolice i vozila.

### 1.1. Dinamika vozila

Na samom početku bitno je definirati osnovne elemente dinamike vozila da bi se kasnije bilo lakše snalaziti u izrazima koji prate rad. U ovom radu potrebno je prikazati osnovne sile i momente koje djeluju na vozilo u nekom koordinatnom sustavu. Taj koordinatni sustav definiran je ISO 8855:2011 normom, a prema tom koordinatnom sustavu prikazane su sile i momenti na vozilo na slici 1.



Slika 1. Sile i momenti na vozilo [1]



**Slika 2. Bočna sila, kut udara vjetra, kut bočnog klizanja vozila [5]**

Slika 1. prikazuje silu u smjeru osi  $x$  koja nastoji zaustaviti vozilo (eng. *Drag*) te moment koji nastoji zakrenuti vozilo oko osi  $x$  (eng. *Roll moment*). U smjeru  $y$  osi djeluje sila koja nastoji pomaknuti vozilo s putanje u stranu te moment oko  $y$  osi koji se javlja uslijed nagnjanja automobila kod ubrzanja odnosno usporavanja (eng. *Pitch moment*). U smjeru  $z$  osi djeluje sila koja pokušava podići vozilo (eng. *Lift*) te moment koji nastoji zakrenuti vozilo oko  $z$  osi (eng. *Yaw moment*). U daljnjem radu pretežno će biti razmatrana sila odnosno pomak u smjeru osi  $y$  te zakret vozila oko  $z$  osi kojeg upravo sila u smjeru osi  $y$  uzrokuje.

## 1.2. Bočna pobuda na vozilo

Bočna pobuda na vozilo jest sila koja gura vozilo s putanje, točnije sila u smjeru  $y$  osi vozila prema slici 2. bočna pobuda može biti uzrokovana, na primjer, naletom vjetra, poprečnim nagibom podloge, centrifugalnom silom u zavoju, pokretom volana itd. Također bočna pobuda može biti uzrokovana tijekom obilaženja nekakvog većeg vozila, koje prekida udar bočnog vjetra te na prolasku vozila slijedi jaki udar vjetra.

U ovom radu bočna pobuda opisana je naletom vjetra na automobil s prikolicom. Da bi se ostvarila bočna pobuda na vozilo vjetar može djelovati u smjeru osi  $y$  ili pod određenim kutem u odnosu na os  $y$  manjim od  $90^\circ$ .

Bočna pobuda može uzrokovati nestabilnost vozila kod koje može doći do gubitka kontrole nad vozilom. Naročito je problematičan slučaj kada vozilo vuče prikolicu iz razloga što zbog svoje konstrukcije ima velik utjecaj na zakretanje vozila odnosno gubljenja stabilnosti.

## 1.3. Konstrukcija prikolice

Prikolice se dijele na prikolice i poluprikolice. One se razlikuju u nekoliko konstrukcijskih rješenja. Prikolica za razliku od poluprikolice sav teret drži na vlastitim osovinama odnosno ne prenosi teret na vučno vozilo, dok poluprikolice dijelom opterećuju vučno vozilo. Također, prikolice za razliku od poluprikolica imaju jednu osovinu koja se može zakretati u odnosu na



uzdužnu liniju vozila te tijekom vožnje pomaže u boljem praćenju putanje vozila. Poluprikolica ima fiksne osovine koje nemaju mogućnost zakretanja. U ovom radu razmatrane su poluprikolice iako se u radu za istu govori prikolica. Poluprikolice su razmatrane iz razloga što se upravo one često koriste kao priključna vozila.

#### **1.4. Standardne ispitne procedure**

Za analizu ponašanja vozila s prikolicom prilikom bočne pobude vjetrom ili nekakve druge bočne pobude postoje standardne ispitne procedure koje propisuju stroga pravila glede ispitivanja vozila u zadanim situacijama, a propisane su normama. Neke od tih situacija su prolazak vozila kroz zavoj, u kojoj se zadaju dimenzije samog poligona, brzina kojom vozilo ulazi u poligon itd. Svaka ispitna procedura ima svoj naziv i svoju oznaku, a neke od ispitnih procedura koje se bave utjecajem bočne pobude na vozilo su sljedeće:

ISO 9815-2003 Road vehicles – Passenger-car and trailer combinations – Lateral stability test:  
Putnička vozila – Osobno vozilo s prikolicom – Ispitivanje bočne stabilnosti

ISO 12021-1996 (2010) Sensitivity to lateral wind Part1 - Open loop test method using wind generator input: Osjetljivost na bočnu pobudu vjetrom. 1. dio - Ispitivanje u otvorenoj petlji korištenjem generatora vjetra.

ISO 19364:2016 Passenger cars – Vehicle dynamics simulation and validation – Steady state circular driving behaviour; Putnički automobili – Simulacija dinamike vozila i vrednovanje – Ponašanje tijekom ustaljene kružne vožnje

ISO 13674-1:2010 Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test; Cestovna vozila – Metoda ispitivanja otvorenom petljom za kvantifikaciju upravljanja u središnjoj osi – Test krivudanjem

ISO 7975:2006 Passenger cars – Braking in a turn – Open-loop test method; Putnički automobili – Kočenje u zavoju – Metoda ispitivanja u otvorenom petljom

ISO 7401:2011 Road Vehicles – Lateral transient response test methods – Openloop test methods; Cestovna vozila – Metode ispitivanja bočnog prijelaznog odziva – Metode ispitivanja otvorenom petljom

ISO 4138:2012 Passenger cars – Steady state circular driving behaviour – Openloop test methods; Osobni automobili – Ponašanje pri ustaljenoj kružnoj vožnji – Metode ispitivanja otvorenom petljom

ISO 3888-2:2011 Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance ; Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene prometnoga traka – 2. dio: Izbjegavanje zapreke

ISO 3888-1:1999 Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double Lane Change ; Osobni automobili – Ispitna staza za manevar nagle promjene pravca gibanja – 1. dio: Dvostruka promjena pravca gibanja

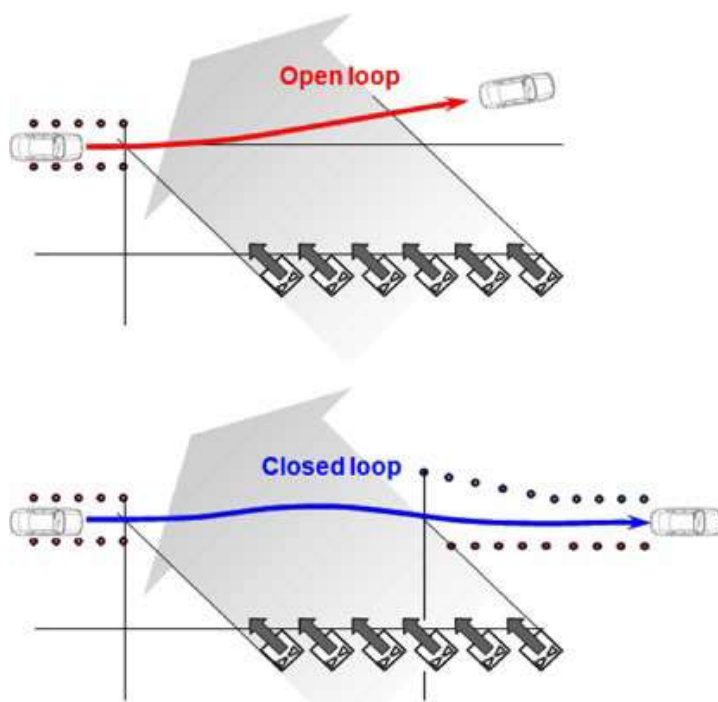
### **1.5. Ispitivanja u otvorenoj i zatvorenoj petlji**

Ispitivanja mogu biti izvršena u otvorenoj i zatvorenoj ispitnoj petlji. Kod ispitivanja u zatvorenoj petlji vozač određuje ponašanje vozila. Vozač upravlja vozilom te djeluje na upravljački sustav intuitivno prema ponašanju vozila. Ispitivanje u zatvorenoj petlji je subjektivno te je teško ponoviti isto ispitivanje. Ispitivanje u otvorenoj petlji više je robotizirano te vozač nema veliki utjecaj na ponašanje vozila tijekom ispitne procedure, odnosno često se u takvom istpitivanju promatra reakcija vozila na pobudu, bez reakcije vozača. Upravljački mehanizam odnosno kontrole vozila ili su zadržavane na istom položaju ili je robotskim putem zadano ponašanje istih mehanizama. Na slici 3. prikazana je razlika između otvorene i zatvorene petlje u ispitnoj proceduri sa bočnim udarom vjetra.

Kod ispitivanja vozila u zatvorenoj petlji dva su načina ispitivanja. Prvi način je da testni vozač djeluje na vozilo do granica stabilnosti. Nakon testne vožnje ponašanje vozila subjektivno se određuje. Drugi način ispitivanja u zatvorenoj petlji jest kada testni vozač ima zadane, odnosno standardne, vozačke manevre nad vozilom te ih uzastopno izvodi, a nakon toga bilježe se i analiziraju rezultati ponašanja vozila.

Kod ispitivanja vozila u otvorenoj petlji ispitivanja se provode također na dva načina. Prvi je način da se volan giba slobodno, a drugi način je da je gibanje upravljača zadano funkcijom.

Ispitivanje u otvorenoj petlji podrazumjeva da se ponašanje vozila kontrolira standardnim pobudama vozila [7].



Slika 3. Otvorena i zatvorena petlja [5]



Slika 4. Ispitivanje u otvorenoj petlji [8]

Na slici 4. prikazano je ispitivanje u otvorenoj petlji, te je vidljivo da je vozilo opremljeno opremom koja kontrolira upravljanje vozila. Ispitivanje u otvorenoj petlji je podložnije kasnijim analizama podataka, te se isto može ponoviti više puta [7].

## 2. Ponašanje vozila s prikolicom u vožnji

Na vozilo s prikolicom veliki utjecaj imaju vanjske pobude na vozilo i prikolicu. Na stabilnost vozila s prikolicom prilikom vožnje utječu razne pobude na vozilo, parametri vozila, performanse vozila te manevri samim vučnim vozilom. Pobude na vozilo u obliku bočnog udara vjetra, ulaska u zavoj, manevra upravljačem, nagiba kolnika imaju utjecaj na stabilnost vozila, a pretežno su to negativni utjecaji u kontekstu zadavanja dodatnih sila na vozilo koje u konačnici mogu dovesti, u ekstremnim uvjetima, i do potpunog gubitka stabilnosti. Parametri vozila također mogu imati negativan, odnosno pozitivan, utjecaj na samu izdržljivost konstrukcije vozila prilikom zadavanja određenih pobuda vozilu. Neki od parametara vozila koji mogu pozitivno, odnosno negativno, utjecati na vozilo su tlak u gumama, konstrukcijska izvedba samog vozila, masa, broj osovine, dimenzije, elektronički sustavi u vozilu (ESP) itd. Veliki utjecaj na stabilnost vozila i prikolice također ima teret koji se prevozi. Masa, položaj, oblik, volumen tereta itd. utječu na stabilnost vozila. Kako bi se lakše shvatila daljnja analiza stabilnosti vozila i prikolice potrebno je opisati sile koje utječu na vozilo, konstrukciju prikolice i ostale utjecaje. .

### 2.1. Sile na vozilu

#### 2.1.1. Vučna sila

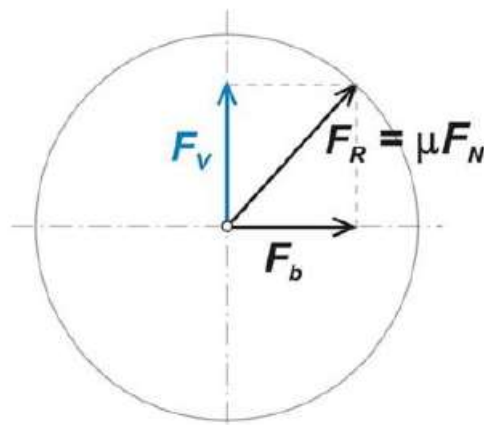
Pogon mora osigurati vučnu silu koja realizira željenu brzinu vožnje.

Vučna sila mora svladati optore vožnje koji se javljaju na vozilu.

Otpori vožnje dijele se na:

- a) Osnovni otpori vožnje - javljaju se prilikom vožnje konstantnom brzinom po ravnoj horizontalnoj cesti bez protuvjetra. ( Otpor kotrljanja, Otpor zraka)
- b) Ostali otpori vožnje – javljaju se prilikom djelovanja nekakvih drugih utjecajnih veličina - ( vožnja usponom, vožnja kroz zavoj, ubrzanje, vožnja protiv vjetra itd.)[2]

U ovom radu razmatrani su pretežno otpori koji imaju nekakvu bočnu komponentu sile na vozilo. Vjetar koji struji pod određenim kutem na vozilo stvara bočnu silu, ali isto tako stvara i uzdužnu silu u smjeru osi  $x$ . Komponenta udara vjetra u smjeru osi  $x$  narušava vučnu silu odnosno uz otpore kotrljanja, otpore vožnje usponom, otpore ubrzanja i otpore zraka stvara dodatne otpore koje nastoje usporiti vozilo. Ovakav vjetar ima značajan utjecaj na stabilnost vozila iz razloga što se rezultatna sila u krugu trenja, može povećati do mjere gubitka stabilnosti.



Slika 5. Elipsa krug trenja [2]

$F_R$  – rezultatna sila, [N]

$\mu$  – faktor trenja, [-]

$F_N$  – reakcija podloge [N]

$F_b$  – bočna sila, [N]

$F_V$  – vučna sila, [N]

$F_R \leq \mu F_N$  - uvjet stabilnosti

Krug trenja, odnosno elipsa trenja, područje je u kojem prisanjanje između vozila i podloge stvara dovoljnu adheziju, rezultiranu faktorom trenja, koja u uvjetima zadane vučne i bočne sile zadržava vozilo na podlozi u statičkim uvjetima trenja. Kada vektorski zbroj vučne sile  $F_V$  i bočne sile  $F_b$  pređe izvan kruga trenja tada vozilo gubi stabilnost odnosno kotač počinje klizati.

### 2.1.2. Bočne sile na vozilu

Za ovu temu iznimno je važno shvaćanje utjecaja bočnih sila na vozilo, stoga će iste biti opisane u ovom poglavlju.

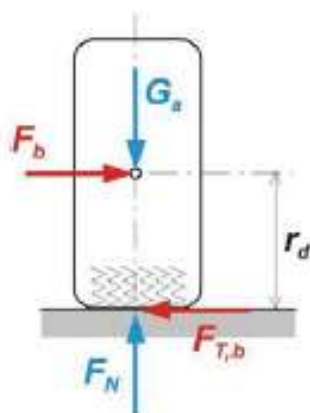
Bočne sile trenja važne su za stabilnost vozila jer se odupiru inercijskim centrifugalnim silama, bočnim silama nagiba terena, bočnim silama udara vjetra.



Slika 6. Gubitak stabilnosti uslijed bočne sile [5]



Slika 7. Prevrtnanje vozila uslijed gubitka stabilnosti [27]



Slika 8. Bočne sile na kotaču [2]

$F_b$  – bočna sila, N

$F_{T,b}$  – bočna sila trenja, N

$\mu_b$  – faktor trenja prijanjanja u bočnom smjeru, N

$G_a$  – adhezivna težina vozila, N

$F_N$  – reakcija podloge, N

$$F_N = G_a \quad 2-1$$

$$F_{T,b} = F_b \quad 2-2$$

Razmatrana bočna sila u ovom radu jest sila koja se javlja od utjecaja bočnog udara vjetra, sila uslijed vožnje kroz zavoj te sila nastala impulsnim zakretom upravljača. Vjetar stvara silu na površini automobila i prikolice i nastoji ih izbaciti s putanje odnosno utječe negativno na stabilnost vozila. U ispitnim uvjetima udar vjetra zadaje se generatorima vjetra, na kojima se može podesiti brzina vjetra, broj generatora vjetra, kut pod kojim vjetar udara na vozilo. Sila koja nastaje utjecajem bočnog udara vjetra ovisi o brzini udara vjetra. Krivulja kojom bi se prikazao utjecaj bočnog udara vjetra raste eksponencijalno u odnosu na brzinu vjetra. Ta krivulja može se usporediti sa karakteristikom krivulje otpora zraka koja se računa sljedećim izrazom:

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v+v_0)^2}{2} \cdot c_w \cdot A \quad 2-3$$

$F_z$  – sila otpora zraka

$\rho_z$  - gustoća zraka, kg/m<sup>3</sup>

$v$  – brzina vozila, m/s

$v_0$  – brzina protuvjetra, m/s

$A$  – čelna površina vozila m<sup>2</sup> (Slika 9.)

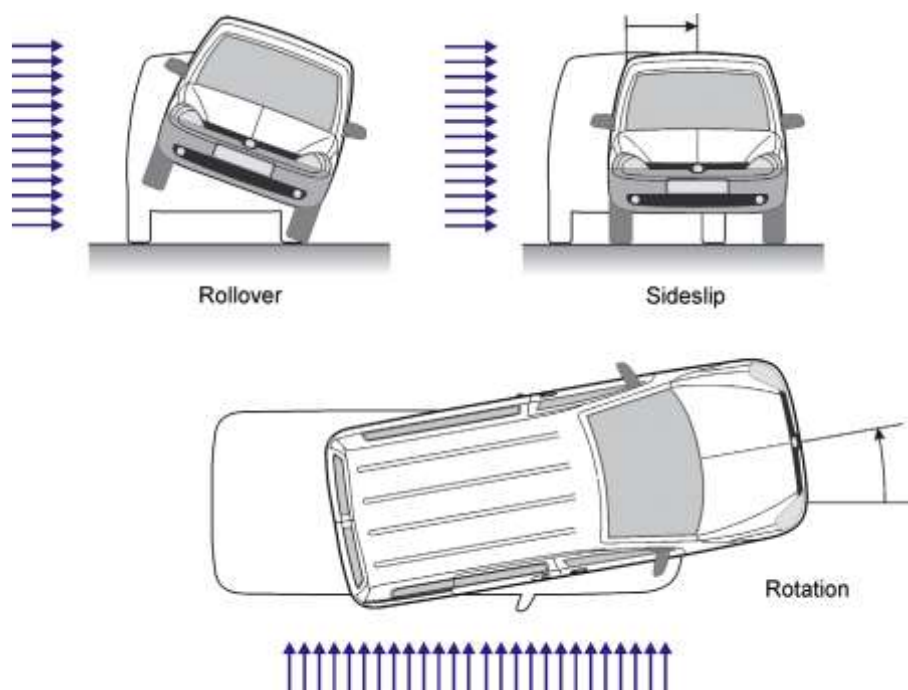
$c_w$  – faktor otpora zraka, -

Faktor otpora zraka proizlazi iz oblika vozila te se određuje simulacijama ili eksperimentalno (u zračnim tunelima). Otpor zraka nastaje tokom vožnje kada vozilo odguruje zrak od sebe i stvara vrtloge (turbulentno strujanje). Na prednjoj strani stvara se pretlak a na stražnjoj podtlak te se tako stvara razlika tlakova između prednje i stražnje strane vozila. Zrak također struji i uz samo vozilo te stvara trenje, a jedan dio zraka mora proći kroz vozilo zbog različitih uređaja u samom vozilu (hlađenje kočnica, ventilacija vozila, hlađenje vozila, itd.) Sve ovo zajedno stvara otpor zraka.



Slika 9. Čeona površina vozila [2]

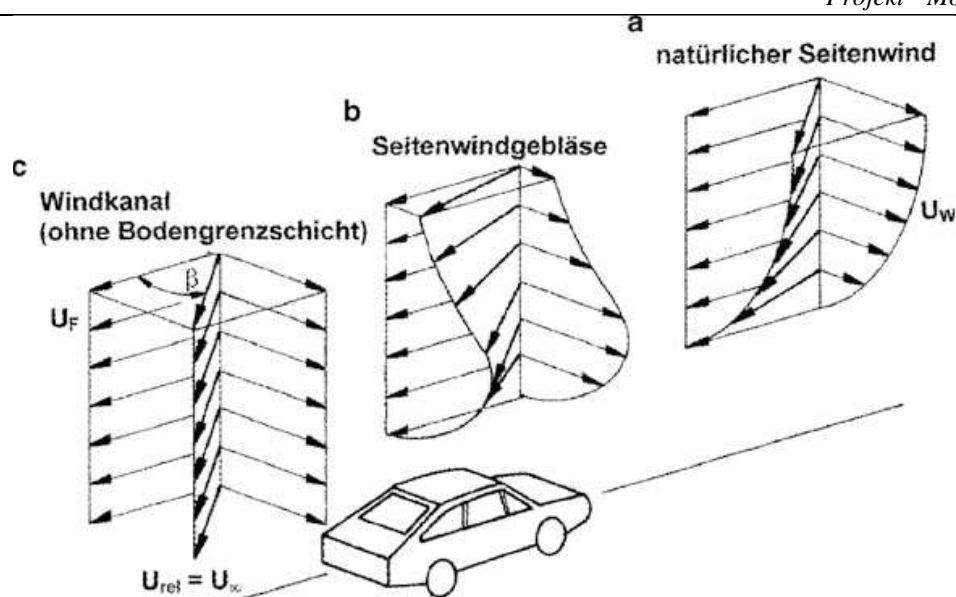
Otpor zraka također je utjecajan i u smislu bočnog udara vjetra. Vjetar udara na vozilo ili u smjeru osi  $y$  ili pod nekakvim kutem manjim od  $90^\circ$  u odnosu na  $y$  os. Vjetar koji puše pod određenim kutem u odnosu na  $y$  os na vozilo djeluje komponentom bočne sile i komponentom uzdužne sile. Uzdužna sila objašnjena je prehodno u smislu otpora zraka i protuvjetra, a bočna sila ima djelovanje na linearni pomak vozila u smjeru  $y$  osi (bočno klizanje), na zakret vozila oko  $z$  osi (zanošenje) te na zakret vozila oko  $x$  osi (prevrtanje).



Slika 10. Posljedice bočnih sila [5]

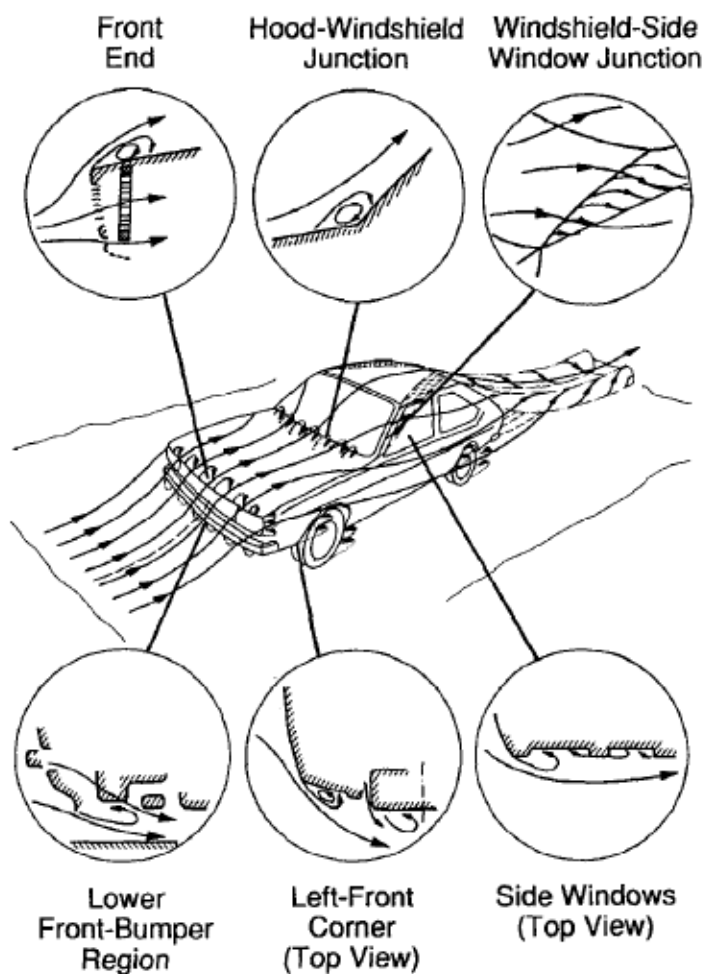
Sa 11. vidljivo je da se samo u zračnom tunelu može postići kontrolirani vjetar pod kutem  $\beta$ . U slučaju generatora vjetra i prirodnog vjetra, vjetar ima nelinearno strujanje odnosno kut  $\beta$  je nekakva interpolacija kuteva koji se javljaju u analizi. Iz tih razloga vrlo je teško simulirati stvarne uvjete vjetra, ali se simulacijama i ispitivanjima u laboratorijima pokušava pobliže ući u samu problematiku udara vjetra te konstrukciju vozila prilagoditi tim zahtjevima.





Slika 11. c) Zračni tunel, b) Generator vjetra, a) prirodni vjetar [5]

Na sile i momente velik utjecaj imaju izbočine i udubine na vozilu. To mogu biti retrovizori, konstrukcijski otvori za hlađenje, dizajnerske izbočine itd. Sva ta nesavršena tijela u pogledu aerodinamike imaju negativan utjecaj na laminarno strujanje zraka oko vozila te uzrokuju velike turbulencije tijekom udara vjetra. Turbulencije koje se javljaju tijekom udara vjetra uzrokuju problematiku u proračunu udara vjetra te je iz tog razloga računalna simulacija samo jedan korak u analizi takvih vozila odnosno sustava vozila [1].



Slika 12. Dijelovi vozila koji utječu na turbulentno strujanje zraka oko vozila [1]

Bočna sila koja se javlja udarom bočnog vjetra računa se sljedećim izrazom:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \cdot H \cdot L \cdot C_{Fy} \quad 2-4$$

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{rel}^2 \cdot H \cdot L \cdot C_{My} \cdot L_{cp} \quad 2-5$$

$F_y$  - bočna sila uslijed udara vjetra, N,

$\rho$  - gustoća zraka, kg/m<sup>3</sup>,

$v_{rel}$  - brzina bočnog vjetra, m/s,

$H$  -visina vozila(udarne površine vjetra), m,

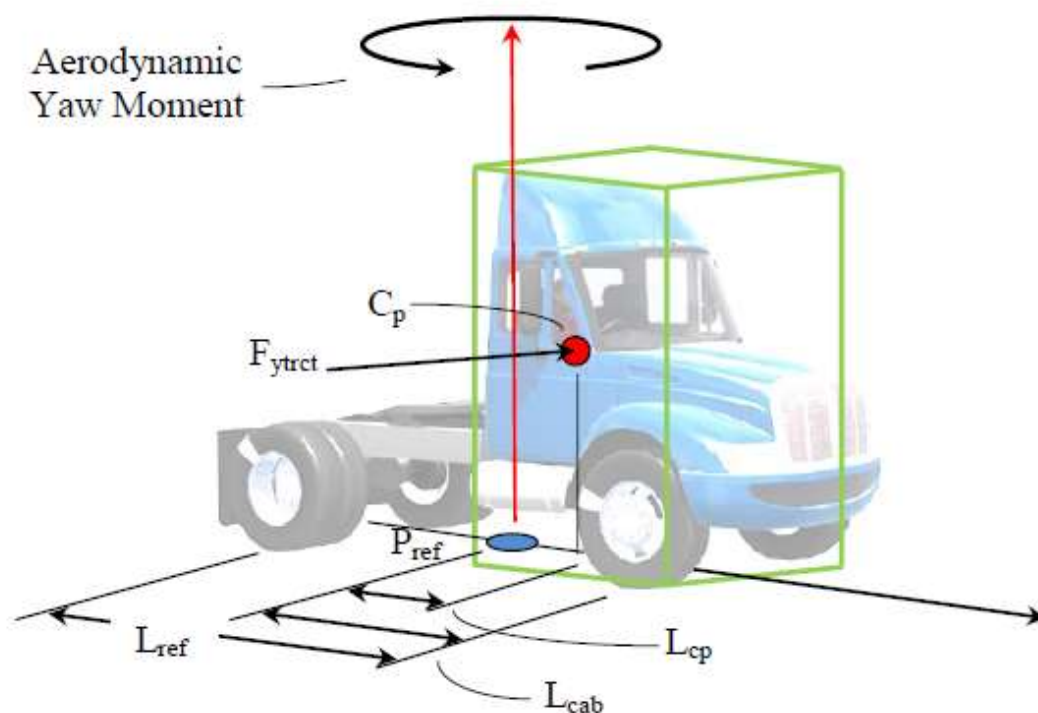
$L$  - duljina vozila(udarne površine vjetra), m,

$C_{fy}$  - faktor kod bočne sile koji uzima u obzir kut pod kojim vjetar udara u vozilo,

$C_{my}$  - faktor kod zakretnog momenta koji uzima u obzir kut pod kojim vjetar udara u vozilo,

$L_{cp}$  - udaljenost između težišta vozila(z osi) i težišta udarne površine vjetra, m,

Sljedećom slikom prikazani su parametri vozila koji utječu na prethodnu formulu za računanje bočne sile udara vjetra [3].



Slika 13. Osnovne veličine na vozilu glede bočnog udara vjetra[3]

## 2.2. Konstrukcija prikolice

Konstrukcija prikolice relativno je jednostavna za prikazati. Prema slici 14. vidljivi su osnovni dijelovi auto prikolice. U ovom slučaju to je prikolica s jednom osovinom na kojoj su kotači. Osovina je spojena na šasiju preko opružnih elemenata u ovom slučaju torzijska opruga i amortizer. Kao opružni elementi mogu se koristiti gibnjevi, gumene opruge itd. Na slici je prikazana prikolica koja je predviđena za veće terete odnosno masu ukupnu veću od 750 kg prema zakonima u EU. Prikolice predviđene za terete, s ukupnom masom uključujući i prikolicu, preko 750 kg opremljene su naletnim kočnicama.

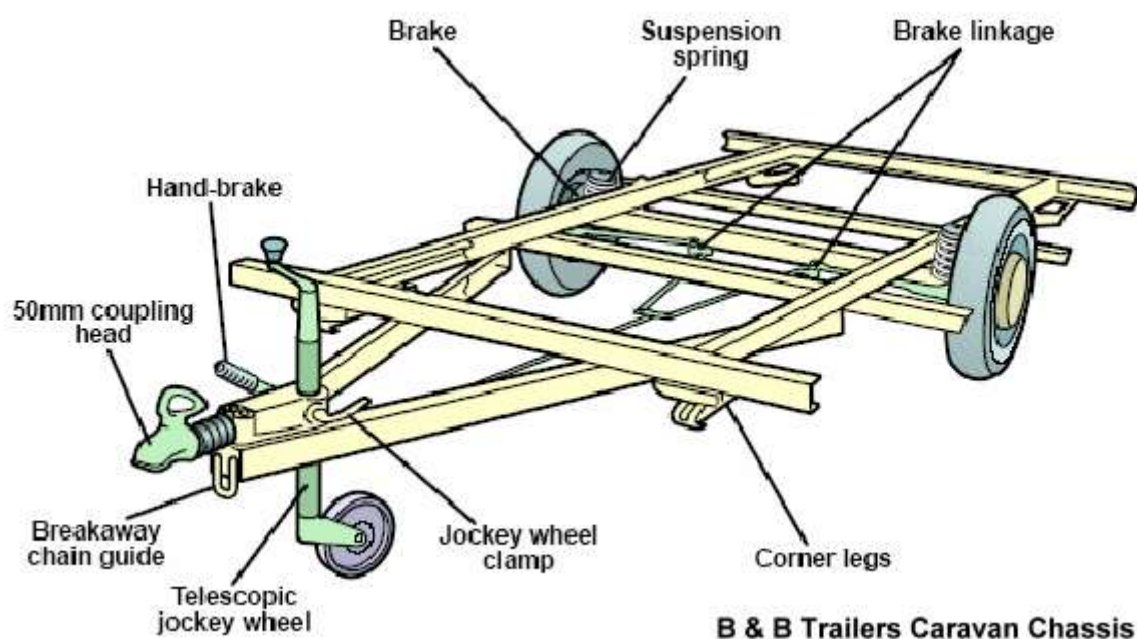
Naletne kočnice rade na principu sile inercije prikolice. Kada vučno vozilo zakoči, inercijom prikolica gura vučno vozilo te se potom aktivira kočnica na samoj priklici. Pretežno su kočnice izvedene preko polužnog mehanizma koji aktivira pakne unutar kotača prikolice i time zaustavlja vozilo.

Prikolica također mora imati i parkirnu kočnicu koja služi dok prikolica nije priključena na vozilo.

Prikolica mora imati priključni element za vozilo koji se naziva spojni element za kuku. Vučna kuka je uređaj za spajanje vučnog vozila i prikolice, a nalazi se na stražnjem dijelu vučnog vozila. Vučna kuka dodatni je element vozila, te se na vozilo montira naknadnom ugradnjom ili može biti tvornički ugrađena po narudžbi. Također je u sklopu priključnog elementa potrebno imati osiguranje odnosno sajlu ili lanac koji je učvršćen za šasiju vozila i prebacuje se preko kuke vozila u slučaju da se prikolica odspoji od vučnog vozila.

Prikolica također može imati pomoćni kotač kod parkiranja prikolice.

Prikolica mora imati utičnicu za rasvjetu vozila odnosno za signalizaciju na prikolici.



Slika 14. Šasija prikolice s označnim komponentama [11]



Slika 15. Priključna spojka i auto kuka [13]

Na šasiju vozila dolazi nekakav tovarni prostor. Na slici 16. to je zatvoreni tovarni prostor koji je kasnije u simulacijama i razmatran zbog svoje velike bočne površine.



**Slika 16. Prikolica jednoosovinska sa zatvorenim tovarnim prostorom [12]**

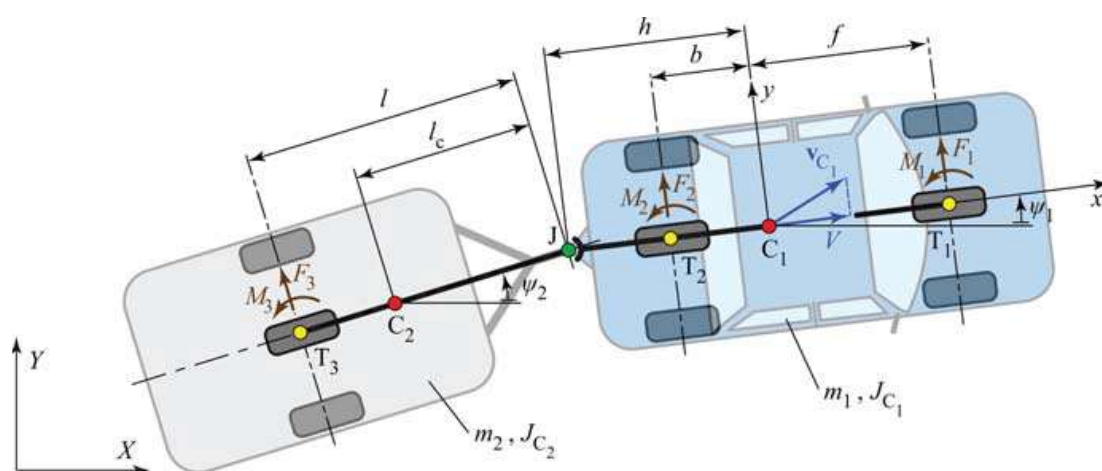
Na slici je prikazana prikolica s jednom osovinom. Prikolice mogu imati i više osovina zbog veće nosivosti, boljeg rasporeda tereta na same osovine te zbog stabilnosti.

Vozilo koje vuče prikolicu mora imati na sebi priključnu kuku, koja po zakonu treba biti atestirana na vozilu, a sama kuka mora imati homologaciju da bi uopće smjela biti montirana na vozilo. Također vozilo mora imati izvedenu utičnicu za signalizaciju prikolice.

### 3. Ponašanje vozila s prikolicom i simulacijski modeli

#### 3.1. Jednostavni modeli

Na slici 17. prikazan je model vozila s prikolicom te su ucrtane osnovne veličine koje se odnose na vozilo s prikolicom. Prikazana su težišta vozila i prikolice te sile koje djeluju na vozilo. Na slici je prikazan model s dva traga kotača i model s jednim tragom kotača, točnije model s jednim tragom kotača prikazan je s ucrtanim silama. Model s dva traga kotača realniji je od modela s jednim tragom kotača. Model s jednim tragom kotača iako pojednostavljen dovoljno je dobar da bi se s njim objasnilo ponašanje vozila.



**Slika 17. Model vozila s prikolicom plus pojednostavljeni model [6]**

U modelu s jednim tragom kotača zanemarene su neke komponente te je time ograničena analiza takvog vozila. Zanemarene su uzdužne sile, zanemareni zakreti oko uzdužne i poprečne osi, zanemaren vertikalni pomak. Masa je koncentrirana u težištu vozila. Kotači su smješteni na sredinu vozila i svaki par je zamijenjen jednim kotačem. Moguće je mjeriti zakret vozila oko  $z$  osi, kutnu brzinu oko  $z$  osi te kut klizanja vozila.

Za razmatranje zakreta oko  $x$  osi potrebno je koristiti model s dva traga kotača.

#### 3.2. Složeni modeli

U ovom poglavlju prikazana je MBS numerička metoda zadavanja modela dinamike vučnog vozila (automobila) i prikolice. Model vozila i prikolice opisan je kao skup krutih tijela povezanih zglobnim vezama zglobovima koji dopuštaju linearne, sferne ili kružne pomake. Također veze mogu biti opružna i prigušna tijela koja su veza relativnog gibanja povezanih krutih tijela. Prema razmatranoj literaturi korišteno je vozilo sa sljedećim značajkama. Korišteno je vučno vozilo (osobno) s četiri kotača. Prednji ovjes je izveden kao neovisno

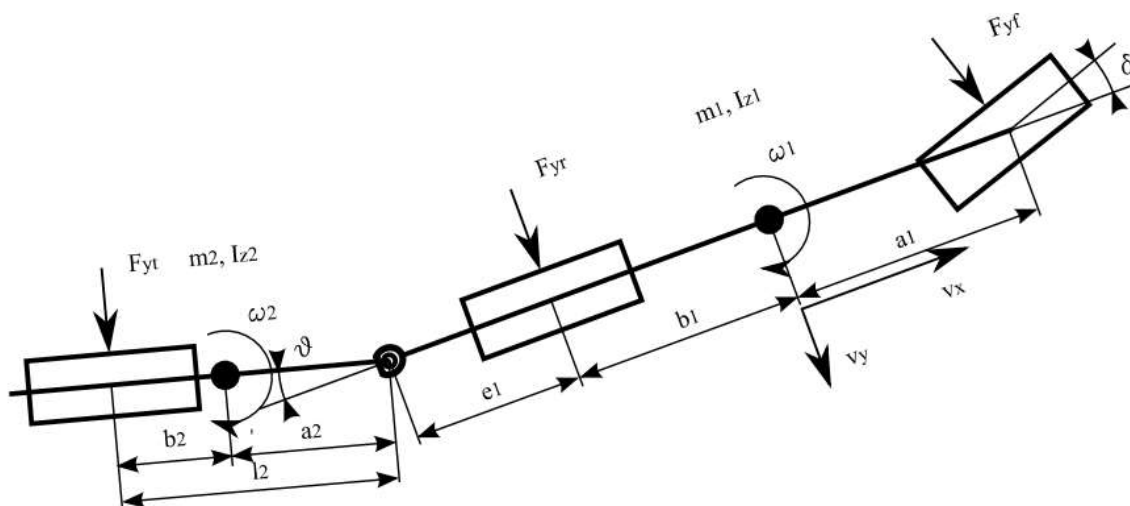
ovješeni, a stražnji ovjes je izveden kao kruta osovina ovješena opružnim elementima s obadje strane. Stražnja osovina također može biti izvedena i kao neovisna, a to ovisi o tipu vučnog vozila te o samoj konstrukciji vozila. Amortizeri i graničnici kod preopterećenja (stoperi) modelirani su s nelinearnom karakteristikom. Modeliran je i upravljački sustav s elementima kao što su letva volana te je poziciran na prednjoj osovini.

Model je sastavljen iz više zasebnih dijelova. Za svaki dio modela potrebno je poznavati veličine momenta inercije i mase. Također su zadane linearne karakteristike opuge. Karakteristika amortizera dobivena je ispitivanjem te je dobiven rezultat nelinearnog karaktera. Karakteristika amortizera dobivena ispitivanjem unosi se u sam model vozila. Također su modelirani graničnici kod preopterećenja, s nelinearnom karakteristikom čije se vrijednosti dobivaju ispitivanjem.

Izvrstan broj simulacija proveden je da bi se prilagodili i uveli programski kodovi razvijeni za generalnu primjenu MBS modeliranja dinamike vozila. Odazivi vozila i prikolice simulirani su te uspoređivani s prethodnim rezultatima i s mjerenim vrijednostima gdje god je to bilo moguće. Simulacijski modeli omogućuju ispitivanje slučajeva koji se u realnim uvjetima ne mogu izbjeći zbog mogućih opasnih ishoda, odnosno uništavanja opreme. Gdje god je moguće provesti realni eksperiment, potrebno je to i napraviti da bi se usporedili rezultati sa simulacijama [16].

### 3.2.1. Simulacijski model u xy ravnini

Slika 18. prikazuje pojednostavljeni model vozila s prikolicom, a on je potreban za daljnje razmatranje izraza i definiranja određenih parametara za analizu dinamike vozila s prikolicom.



Slika 18. Pojednostavljeni model vozila i prikolice s jednim tragom kotača[16]

Izrazi za linearne pomake i kutne zakrete sustava vozilo s prikolicom u xy ravnini, podrazumjevajući kinematičke modele u kojem su sile na kotač proporcionalne kutu klizanja kotača, izvode sustave jednažbi zapisane u matričnoj formi:

$$M\dot{x} = D(v_x)x + Eu + F\delta \quad 3-1$$

U izrazu  $x$  predstavlja vektor položaja,  $u$  predstavlja ulazni signal, a  $\delta$  predstavlja kut zakreta upravljača. Za ovu uporabu nije potrebno razmatrati ulazni signal te je korisno pomnožiti izraz s inverzom matrice  $M$ , tada izraz glasi:

$$\dot{x} = A(v_x)x + G\delta \quad 3-2$$

Ovaj model prikazuje utjecaj parametara vozila i prikolice na stabilnost sustava vozilo i prikolica i na početak nestabilnosti istog sustava.

Za daljnje razmatranje sustava vozilo i prikolica analizira se isti sustav bez pomaka sustava za upravljanje. S pretpostavkom konstantne brzine prethodni izraz prelazi u sljedeći oblik:

$$\dot{x} = Ax \quad 3-3$$

Prema ovom izrazu sustav je asimptotski stabilan ako mu sve svojstvene vrijednosti matrice imaju realne dijelove manje od nule. Svojstvene vrijednosti matrice mogu biti prikazane sljedećim izrazom:

$$s_{1,2} = -d \pm j\omega_d \quad 3-4$$

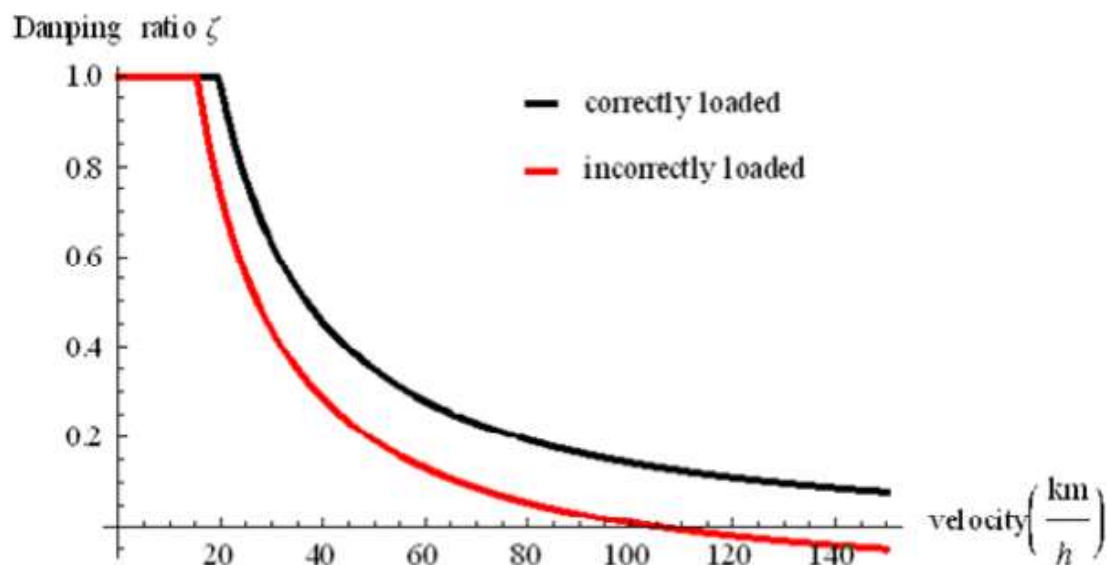
Za prethodni izraz vrijedi da je  $j$  imaginarna veličina,  $d$  – koeficijent prigušenja,  $\omega_d$  – frekvencija prigušenja. Koeficijent prigušenja dan je sljedećim izrazom:

$$\zeta = -\frac{d}{\sqrt{d^2 + \omega_d^2}} \quad 3-5$$

Negativni koeficijent prigušenja  $\zeta$  označava nestabilan sustav.

Koeficijent prigušenja  $\zeta$  ovisan je o brzini vožnje te može biti razmatran za različite parametre sustava. Da bi se dobili rezultati ispitivanja odnosno konkretna svojstva sustava vozilo i prikolica, korišteni su gornji izrazi i konkretno testno vozilo. Za prvo ispitivanje teret je bio raspoređen prema preporuci proizvođača prikolice, a vozilo je ostalo stabilno do brzine vožnje 150 km/h. Također je provedeno ispitivanje vozila s nepravilno raspoređenim teretom te su dobiveni rezultati u kojima je vozilo izgubilo stabilnost kod brzine vožnje 105 km/h [16].





Slika 19. koeficijent prigušenja za pravilno i nepravilno opterećenu prikolicu [16]

### 3.3. Eksperimentalna analiza i potvrda podataka

Da bi se potvrdio MBS simulacijski model i analitički model u xy ravnini proveden je eksperiment s istom brzinom vožnje te istim bočnim pobudama. Pobude koje se izводе u ovom ispitivanju kratkih su impulsnih pokreta volana u jednom i drugom smjeru, da bi se vozilo izbacilo iz stabilnog ponašanja.

Oprema korištena na ispitnom modelu bilježi pomake upravljača, kut između vučnog vozila i prikolice, uzdužne i poprečne brzine prikolice te akceleracije u sve tri osi prikolice, vozila i kotača prikolice.

Senzor na upravljaču bilježi pomake upravljača te služi da bi se zadani impuls volana koji zadaje vozač vrednovao te da bi sa sigurnošću bilo poznato da kasnije vozač nije imao djelovanja na upravljač.

Kut između vučnog vozila i prikolice daje konkretnu sliku stabilnosti sustava. Ako amplituda kutne oscilacije opada sustav je stabilan, ali ako amplituda raste tada je sustav nestabilan.

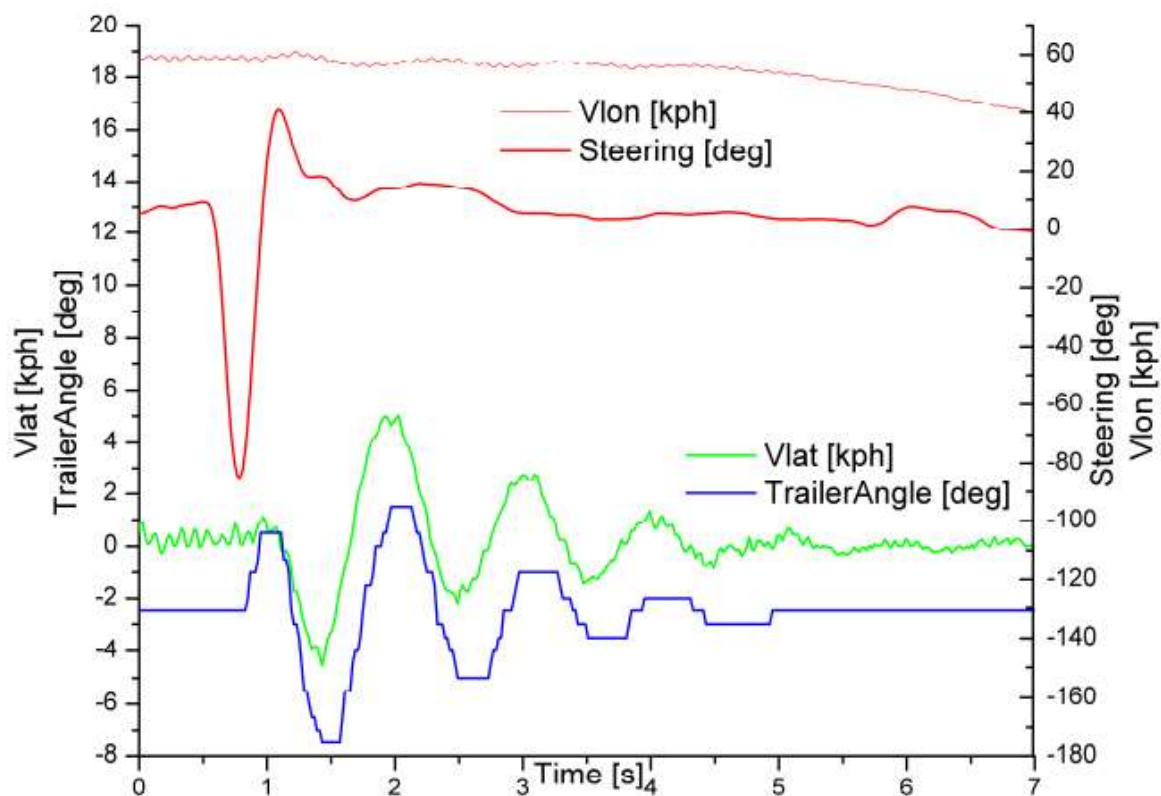
Senzor koji mjeri uzdužnu brzinu vožnje bitan je u pogledu određivanja brzine pri kojoj je vozač napravio pokret volanom te započeo oscilacije vozila. Senzor bočne brzine dodatni je parametar koji pokazuje stabilnost vozila i prikolice.



**Slika 20. Uređaj za mjerenje kuta između vučnog vozila i prikolice [16]**

Podaci koje mjere akcelerometri iznimno su važni, a posebno su važni podaci za bočna ubrzanja prikolice iz razloga što označavaju nestabilnost prikolice.

U ovom ispitivanju zbog sigurnosnih razloga vozilo se nije ispitivalo do kritične brzine, nego su vrednovani rezultati i uspoređivani na manjim brzinama te na osnovu njih doneseni daljnji zaključci.



**Slika 21. Rezultati mjerenja (uzdužna brzina , bočna brzina, kut zakreta upravljača , kut između vozila i prikloce) [16]**

Tablica 1 . Usporedba rezultata[16]

	$V_{\text{kritično}}$	$\zeta_{60}$	$\zeta_{50}$	$\zeta_{40}$
Model u xy ravnini	105	0,130	0,191	0,284
MBS model	105	0,129	0,179	0,223
Eksperiment	-	0,132	0,165	-

Iz tablice je vidljivo da se rezultati poklapaju relativno dobro različitim metodama. Sami modeli kojima se modelira vozilo nikad nisu dovoljno točni te se neke stvari zanemare, ali unatoč tome dovoljno dobri rezultati se dobivaju. U eksperimentu također treba imati na umu da ni točnost mjernih uređaja nije savršena. Iz ovog se može zaključiti da je važno provoditi i eksperimente ali da se simulacijama uvelike olakšava posao glede analiziranja dinamike vozila. Kasnije u radu prikazan je simulacijski model u programskom paketu CarSim te su opisane slične situacije bočne pobude prikolice [16].

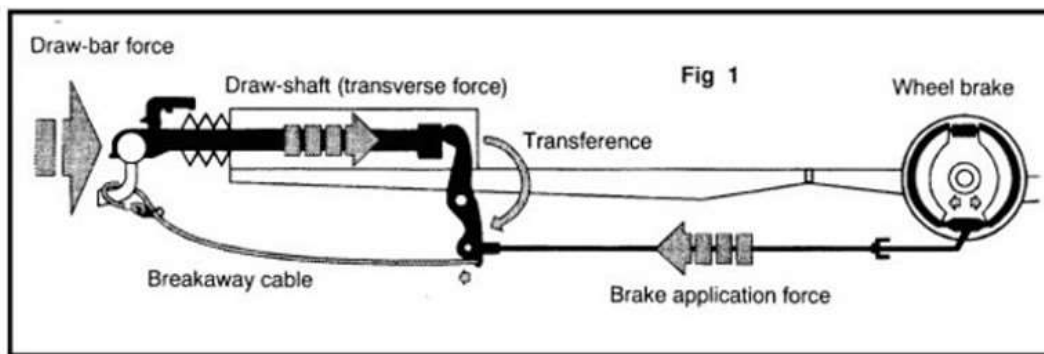
### 3.4. Konstrukcijska rješenja suzbijanja problema gubitka stabilnosti vozila s prikolicom

U ovom poglavlju ukratko su objašnjena neka konstrukcijska rješenja koja pomažu vozilu s prikolicom u trenutcima gubitka stabilnosti. Najjednostavniji odnosno najčešći primjer je naletna kočnica koja je prema zakonima i obavezna za prikolice ukupne mase veće od 750 kg. Dalje su objašnjeni sustavi koji elektro mehaničkim napravama djeluju na stabiliziranje prikolice u situaciji gubitka stabilnosti. Čest primjer gubitka stabilnosti je, upravo opisan u prethodnom poglavlju, kada prikolica dobiva nekakav impuls oscilacije u bočnom smjeru, tada nestabilno vozilo sve više povećava svoju amplitudu i u konačnici vozilo potpuno gubi stabilnost. Sljedeći sustavi imaju zadatak upravo suzbiti moguće oscilacije prikolice od zadane putanje odnosno uslijed nekakvog bočnog pomaka stabilizirati vozilo s prikolicom.

#### 3.4.1. Naletna kočnica

Naletna kočnica najjednostavniji je element sigurnosti koji je danas široko rasporstranjen u korištenju autoprikolica. Ovaj sustav je ukratko već objašnjen u tekstu prije. Sustav radi na principu inercijskih sila prikolice, koje tijekom kočenja vučnog vozila nastoje pogurati vozilo naprijed. Guranjem vozila inercijske sile djeluju na mehanizam koji silu inercije prenosi na kočnice prikolice koje se polužnim mehanizmom aktiviraju.

## Operation of the overrun braking system.

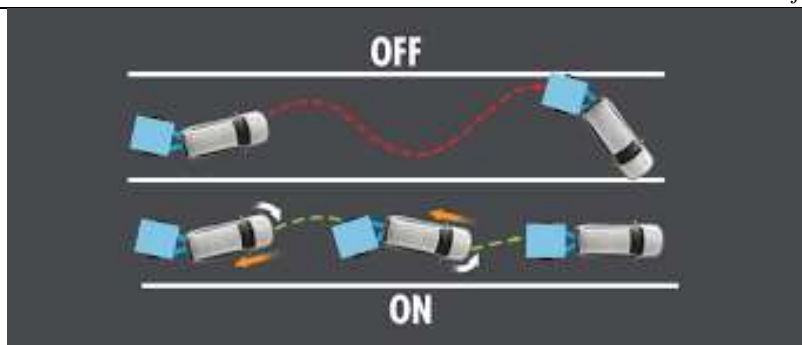


Slika 22. Sustav naletne kočnice [14]

Prema slici je vidljiv način rada polužnog mehanizma. Sila se prenosi s kuke vozila preko prigušnog elementa koji ima zadaću ublažiti vibracije između vozila i prikolice, te ublažiti aktiviranje kočnice na vozilu. Sustav sa krutim polužnim mehanizmom ima jak brz utjecaj na aktiviranje kočnice te može dovesti do preranog i neželjenog kočenja prikolice. Na slici je također vidljiva sajla koja se prebacuje preko vučne kuke vozila, a u slučaju da vozilo, neželjeno u vožnji otpusti prikolicu, ta sajla povlači mehanizam i koči prikolicu. Ovaj sustav, iako jednostavan, uvelike povećava sigurnost vuče prikolica većih dimenzija i masa.

### 3.4.2. Trailer stability assist (TSA)

Ovaj sustav smješten je u automobilu i nije direktno vezan za prikolicu. Sustav očitava ponašanje prikolice kod gubitka stabilnosti te pravilnim kočenjem i elektronskim oduzimanjem gasa, sprječava gubitak stabilnosti vozila. Sustav radi na sličnom principu kao i ESP (*Electronic Stability Program*). Na slici 23. pokazan je princip rada. U slučaju kada prikolica počinje oscilirati uslijed nekakve bočne pobude vozilo koči onu stranu kotača koja stvara suprotan moment momentu zakretanja prikolice. Tim djelovanjem vozilo anulira kutne pomake prikolice te ju nastoji stabilizirati, dok vozilo djeluje kočnicama na prethodno objašnjen način također elektronskim putem oduzima gas na vozilu te time smanjuje brzinu vožnje i skup vozila s prikolicom dovodi u stabilnu situaciju. Oduzimanjem gasa vozilo djeluje i na vozačevu svijest te ga upozorava na danu situaciju i na oprez [20].



Slika 23 . Trailer stability assist način rada [25]

### 3.4.3. IDC Intelligent drive control

Ovaj sustav za razliku od prethodno objašnjenog nije vezan za vozilo nego je direktno povezan s prikolicom elektro mehaničkim sustavima. Sustav djeluje na način da su na prikolici postavljeni akcelerometri koji prilikom očitavanja bočnog ubrzanja šalju računalu smještenom na prikolici signal. Nakon što računalu primi signal aktivira obje kočnice koje neovisno o vozilu prikolicu nastoje zaustaviti te ju na taj način i vraćaju u stabilan položaj. Kada se prikolica i vozilo nađu u nestabilnom položaju javlja se relativni zakret prikolice u odnosu na vozilo. Kada bi vozilo naglo zakočilo prikolica bi inercijom još više zakrenula vučno vozilo te vrlo moguće odgurala vozilo s putanje. U slučaju kada postoji ovakav sustav montiran na prikolicu, kočenjem prikolice bez aktiviranja kočnice vučnog vozila za cilj ima ispraviti vozilo na zadanu putanju. Jednostavnom pojavom sila kočenja na stražnjim kotačima prikolice uz vučnu silu na kotačima vučnog vozila, vozilo i prikolica nastoje se razvući, a upravo na taj način vraćaju se u stabilnu poziciju te se relativni kut zakreta između prikolice i vučnog vozila vraća na nulu.

Ovaj sustav je relativno jednostavan te može biti montiran na prikolice bez pretjeranih promjena. Za ovakav sustav potrebno je imati dodatno napajanje elektromehaničkog sustava električnom energijom s vozila [21].



Slika 24. IDC elektro mehanički sustav prikolice [17]

### 3.4.4. Sensabrake EAS

Ovaj sustav predstavlja napredniji sustav kočenja za razliku od naletne kočnice. Ovaj sustav sadrži pneumatsko hidraulički aktuator koji za razliku od elektrohidrauličkog aktuatora ima bolju brzinu odaziva. Ovaj sustav zahtjeva montažu i na vučno vozilo jer je povezan s elektronikom automobila te na odaziv pedale kočnice aktivira i kočnicu prikolice. Od prethodno navedenih sustava, ovaj sustav je najkompliciraniji za montažu, ali zato je iznimno učinkovit u uvjetima otežane stabilnosti vozila. Sustav radi na principu reagiranja na vozačev pritisak pedale kočnice u samom vučnom vozilu. Sustav može biti spojen s vozilom te pratiti preko elektronike vozila kada vozač aktivira pedalu kočnice, ali također može biti opremljen dodatnim senzorom koji se montira upravo na pedalu kočnice te brže reagira na samo kočenje vozila s prikolicom i daje dodatnu sigurnost vuči prikolice [22].



Slika 25. AL-KO Sensabrake kit za montažu sustava kočenja prikolice [26]

## 4. Standardne ispitne procedure

U ovom poglavlju prikazane su standardne ispitne procedure u kojima se analizira utjecaj bočne pobude na vozilo. U sljedećim ispitnim procedurama propisani su strogi uvjeti izvođenja ispitivanja na poligonima. Bočna pobuda može uzrokovati nestabilnost vozila stoga je vozilo potrebno ispitati prema normiranim procedurama kojima se dokazuje sposobnost vozila za izlazak na cestu.

Ponašanje osobnog vozila ili lakog teretnog vozila s prikolicom izuzetno je važno glede aktivne sigurnosti vozila. Bilo koje vozilo koje vuče za sobom prikolicu s vozačem formira vožnju u zatvorenoj petlji. Vrednovanje i ocjenjivanje dinamičkih karakteristika vozila s prikolicom te vozačem izuzetno je komplicirano zbog ispreplitanosti samih karakteristika zasebno vozila, prikolice i vozača koje su i same po sebi kompleksne. Za precizno i valjano definiranje karakteristika vozila s prikolicom potrebno je provesti više različitih ispitivanja u različitim uvjetima.

### 4.1. Putnička vozila – Osobno vozilo s prikolicom – Ispitivanje bočne stabilnosti ISO 9815:2003

Ova norma odnosi se na ispitivanje bočne stabilnosti vozila s prikolicom. Ova norma odnosi se na osobne automobile prema normi ISO3833, na lagana teretna vozila, te na kombinacije vozila s prikolicom.

Test bočne stabilnosti određuje karakteristiku prigušenja oscilacija u smjeru osi  $y$  za vozilo s prikolicom u uvjetima kada na vozilo djeluje pobuda određenim impulsnim pomakom upravljača vozila. Vozilo se ispočetka vozi pravocrtno po zadanoj putanji bez oscilacija upravljača. Potom se inicira oscilacija jednim impulsnim pomakom upravljača. Nakon impulsnog pomaka upravljača upravljač se drži fiksnim bez pomaka dok se vozilo ne smiri. Ispitivanje se vrši s više različitih brzina vožnje. Nestabilne situacije, u kojima vozilo gubi u potpunosti kontrolu, odnosno u kojima ne postoji prigušenje oscilacije relativnog gibanja vozila i prikolice, ne razmatraju se ovom normom [28].

#### 4.1.1. Varijable i simboli

U daljnjem tekstu u indeks C odnosi se na vučno vozilo, a indeks T na prikolicu.

$\Delta\psi$  - Kut između  $x$  osi prikolice i  $x$  osi vučnog vozila. Predstavlja zakret vučnog vozila u odnosu na prikolicu.

$\bar{G}$  - Prosječni gradijent ispitne staze. Promjena nagiba staze između dvije točke na stazi podijeljena s horizontalnom udaljenošću između tih dviju točaka.

Kada se vrši ispitivanje prema ovoj normi potrebno je mjeriti sljedeće veličine:

- kut zakreta upravljača,  $\delta_H, ^\circ$ ,
- uzdužna brzina,  $v_x, \frac{m}{s}$ ,
- bočno ubrzanje prikolice,  $a_{yT}, \frac{m}{s^2}$ ,
- kut između x osi prikolice i x osi vučnog vozila,  $\Delta\psi, ^\circ$ .

Sljedeće veličine mogu biti mjerene:

- kutna brzina vučnog vozila oko z osi,  $\frac{d\psi_C}{dt}, \frac{^\circ}{s}$ ,
- kutna brzina prikolice oko z osi,  $\frac{d\psi_T}{dt}, \frac{^\circ}{s}$  [28].

#### 4.1.2. Uvjeti ispitivanja

Mjerna oprema obavezna je i na vučnom vozilu i na prikolici. Mjerna oprema treba biti instalirana na vozilo i prikolicu prema normi *15037-1 : 1998 Road vehicles Vehicle dynamics test methods – Part 1 – General conditions for passenger cars*.

Prosječni gradijent ispitne staze  $\bar{G}$  treba biti u toleranciji  $\pm 0,01$ , a to je praktički ravna staza. U svakom ispitivanju potrebno je mjeriti gradijent  $\bar{G}$ . Širina staze treba biti 8 m, a ispitivanje treba biti provedeno u oba smjera staze.

Brzina vjetra ne smije prelaziti 2,5 m/s [28].

#### 4.1.3. Zahtjevi na postavljanje tereta na prikolicu i vozilo

Masa vučnog vozila treba biti masa praznog vozila plus vozač i mjerna oprema (ne smije prelaziti 150 kg). Mjerna oprema treba biti pozicionirana tako da minimizira utjecaj na zakretni moment inercije oko z osi. Ispitivanja trebaju biti provedena prilikom maksimalnog opterećenja vozila ili drugog opterećenja. Vozilo treba biti opterećeno putnicima po 68 kg na svakom sjedalu plus pravilno raspoređena prtljaga u tovarnom prostoru. Ukupna masa vozila s prtljagom i putnicima kao i dijelom tereta koji se preuzima s prikolice ne smije biti veći od dopuštene maksimalne mase vozila, također opterećenje na stražnjoj osovinu ne smije preći dozvoljeno opterećenje prema uputama proizvođača.

Prikolica treba biti opterećena do maksimalne dopuštene mase ili maksimalno dopuštene mase vozila zajedno s prikolicom. Ako to konstrukcija prikolice dopušta masa tereta treba biti raspoređena tako da bude reprezentativni primjer realne uporabe prikolice. Masa, težište prikolice i moment inercije oko z osi treba biti izmjereno te zapisano u bilješke tijekom ispitivanja.



Vučna kuka treba biti opterećena maksimalnim dopuštenim statičkim opterećenjem, koje je određeno i maksimalnim opterećenjem na vučnom vozilu. Ako sila na vučnoj kuki prelazi dopuštenu silu određenu stražnjom osovinom vozila tada se kuka treba rasteretiti ili rasporedom mase na pirkolici ili smanjenjem ukupne mase na prikolici. Također ispitivanje treba biti provedeno i s najmanjom dopuštenom masom na vučnoj kuki.

Mehanizam za raspodjelu tereta na vučnoj kuki koristi se kada je masa tereta prikolice velika te se time reducira kut zakreta vozila oko y osi te dovodi prikolicu i vučno vozilo u ravnotežni položaj. Dodatkom ovakvog uređaja između vučnog vozila i prikolice dodaje se moment koji rasterećuje stražnju osovinu vučnog vozila te istu silu raspoređuje na prednju osovinu vučnog vozila te na prikolicu. Ovakav uređaj povećava prigušenje zakreta vozila u odnosu na prikolicu, a smanjuje podupravljenost vučnog vozila prilikom bočnog ubrzanja.



**Slika 26. Mehanizam za raspodjelu tereta na vučnoj kuki[23]**

Mehanizam za raspodjelu tereta na vučnoj kuki potrebno je podesiti prema preporukama proizvođača. Kada je vozilo neopterećeno izmjeri se vertikalna udaljenost od poda do ovješnog dijela vozila u centru prednje i stražnje osovine. Nakon što se vozilo optereti i podesi mehanizam za raspodjelu tereta, ponovo se mjere vrijednosti od ovješnog dijela vozila do poda, ako je mehanizam za raspodjelu tereta dobro podešen vrijednosti spuštanja vozila na prednjem i stražnjem kraju ne smiju se razlikovati za više od 10 mm. Tijekom priključka mehanizma za raspodjelu tereta na vučnoj kuki javlja se moment priključivanja. Taj moment računa se sljedećim izrazom:

$$M_{Yeq} = F_{Zwfc}(I_c + e_c) + F_{Zwrc}(e_c) - M_cg(d_c + e_c) \quad 4-1$$

$M_{Yeq}$  - moment koji se javlja tijekom raspodjele tereta mehanizmom za raspodjelu tereta, Nm,

$F_{ZwfC}$  - suma sila na prednjim kotačima uslijed opterećenja priključenom prikolicom i uređajem za raspodjelu tereta, N,

$F_{ZwrC}$  - suma sila na stražnjim kotačima uslijed opterećenja priključenom prikolicom i uređajem za raspodjelu tereta, N,

$g$  - gravitacija,  $m/s^2$ ,

$I_C$  - raspon kotača vučnog vozila, mm,

$M_C$  - masa vučnog vozila, kg,

$d_C$  - udaljenost težišta vučnog vozila od težišta prikolice, mm,

$e_C$  - udaljenost središta kugle vučne kuke i središta stražnje osovine, mm [28].

#### 4.1.4. Princip ispitivanja

Prije ispitivanja vozilo treba biti zagrijano na radnu temperaturu, a svako ispitivanje mora početi s pravocrtnim gibanjem vozila konstantnom brzinom.

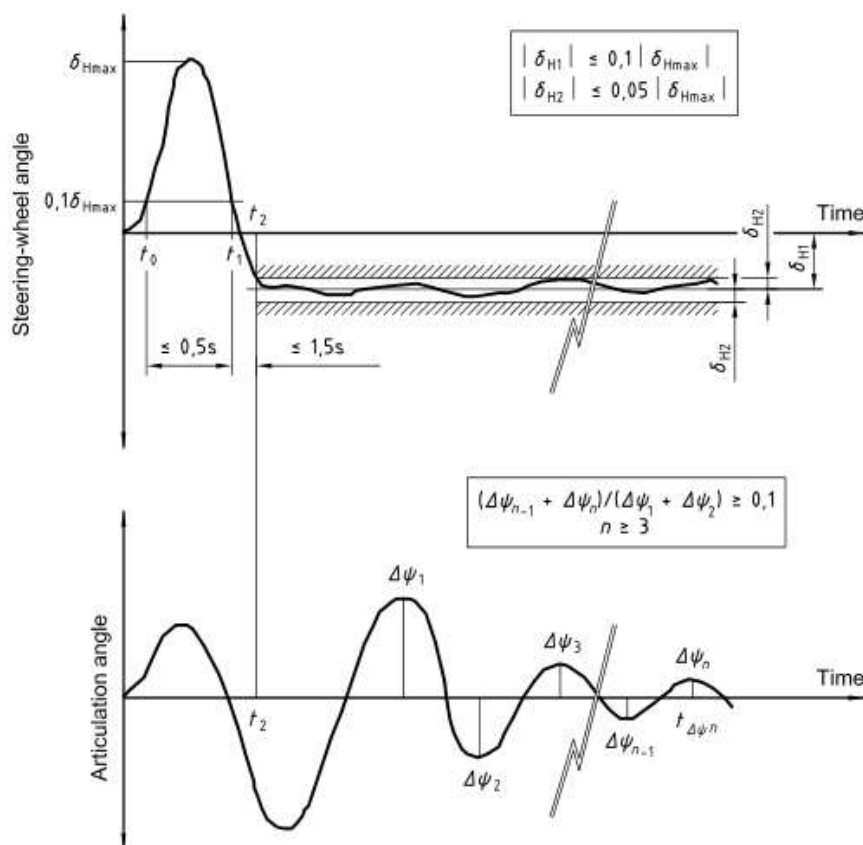
Početna brzina ispitivanja treba biti 50 km/h. Brzine vožnje trebaju biti povećavane prema zadanim razlikama brzina. Pri brzinama kod kojih je prigušenje  $\geq 0,15$  povećanje brzine treba biti  $\leq 10$  km/h, a kod prigušenja manjih od 0,15 povećanje brzine treba biti  $\leq 5$  km/h. Najveća ispitna brzina treba biti barem 90 % od izračunate brzine kod koje je prigušenje jednako nuli. Mjere opreza trebaju biti razmotrene u slučajevima kad se očekuje maleno prigušenje, a tad početna brzina ispitivanja može biti i manja od 50 km/h. Tijekom samog ispitivanja kada se vozilu doda impuls na upravljaču vozilo ne smije prelaziti uzdužnu akceleraciju od  $\pm 0,1$   $m/s^2$ .

Oscilacija vozila i prikolice oko z osi treba biti zadana impulsnim pokretom upravljača. Gdje god je izvedivo amplituda upravljača koja uzrokuje oscilacije treba biti takva da se javi bočna akceleracija u težištu prikolice  $(4 \pm 1)$   $m/s^2$ . Ako nije moguće dobiti zadanu vrijednost akceleracije tada je potrebno zadati takav impuls upravljača da se dobije maksimalna bočna akceleracija u težištu prikolice. Stvarna izvedena bočna akceleracija treba biti zabilježena u izvješću ispitivanja. Na sljedećim dijagramima prikazani su odazivi vozila na impuls upravljača.

$t_0$  – vrijeme u kojem zakret upravljača dostigne 10 % zadane amplitude, s,

$t_1$  – vrijeme u sekundama u kojem zakret upravljača pade na 10 % zadane amplitude, s,

$t_2$  – vrijeme u sekundama nakon kojeg zakret upravljača ostaje u zadanoj toleranciji, s.



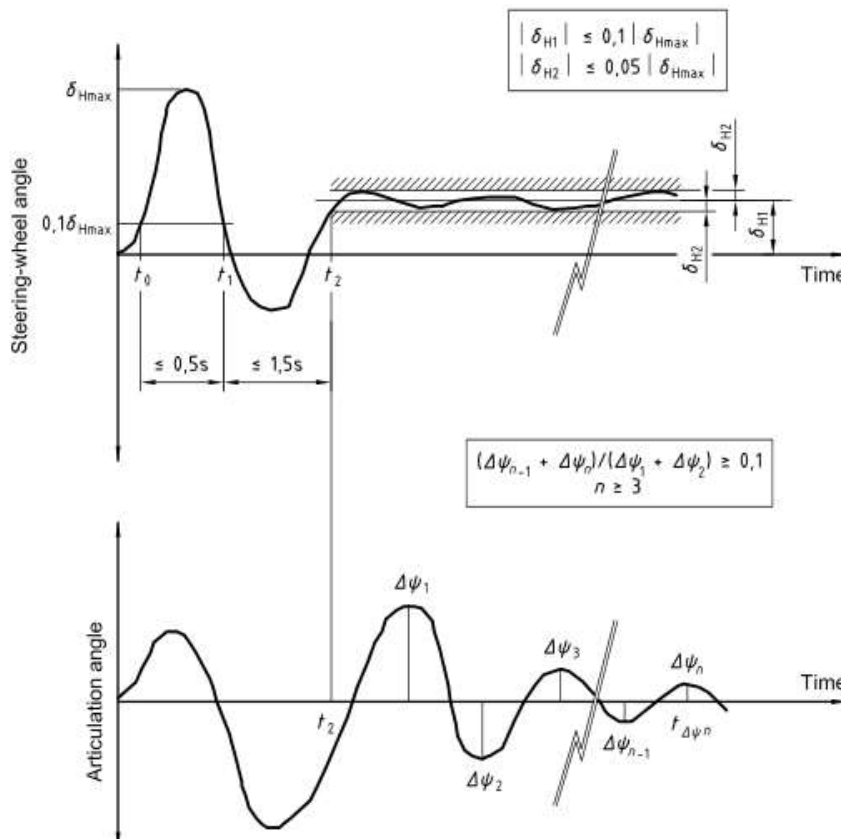
**Slika 27. Odaziv prikolice i vozila na impuls upravljača [28]**

Trajanje impulsa zakreta upravljača ( $t_1 - t_0$ ) ne smije prelaziti 0,5 s. Impuls zakreta volana može završiti u početnoj poziciji kao na slici 27. ili dodavanjem korekcije u suprotnom smjeru kao na slici 28. tako da se vozilo može vratiti svojoj početnoj putanji. Trajanje korekcije putanje ne smije prekoračiti 1,5 s. Srednje odstupanje zakreta volana od ravnog položaja nakon impulsa  $\delta_{H1}$  ne smije prekoračiti 10 % od maksimalne amplitude, a odstupanje od srednjeg odstupanja  $\delta_{H1}$  ne smije biti veće od 5 % maksimalne amplitude zakreta volana.

Na slikama (Slika 27., Slika 28.) vidljiv je način zadavanja impulsa zakreta volana u gornjem dijagramu i odaziv vozila i prikolice u donjem dijagramu. Donji dijagram predstavlja relativni zakret vučnog vozila i prikolice u odnosu na z os, a prikazuje prigušenje tog kuta vozila, odnosno smirivanje pobuđenog vozila. Na prvoj slici prikazan je impuls vozila u kojemu se na upravljaču zadaje kut u jednom smjeru te odmah potom zadaje se kut u suprotnom smjeru i dži se ta vrijednost unutar 10 % prve vrijednosti. Na drugoj slici razlika je u tome što se nakon zakreta u drugom smjeru vozilu ponovno zadaje zakret u prvom smjeru te se održava također na 10 % prvog zadanog impulsa.

Kasnije u simulacijama u programskom paketu CarSim prikazana je simulacija sličnih uvjeta procedure kao i prema normi. Impulsna pobuda upravljača zadavana je oslanjajući se na

zahtjeve norme. Impuls upravljača zadan je grubim skokovima, ali su ispoštovani zahtjevi norme [28].



Slika 28. Odaziv vozila i prikolice na zakret upravljača [28]

#### 4.1.5. Analiza podataka

Efektivno uzdužno ubrzanje mjereno u  $\text{m/s}^2$  treba biti prikazano za svako ispitivanje. Vrijednost ovog ubrzanja jest suma ubrzanja u uzdužnom smjeru i gravitacijskog ubrzanja prosječne komponente uslijed gradijenta staze.

$$a_E = \frac{v_x(t_{\Delta\psi n}) - v_x(t_2)}{t_{\Delta\psi n} - t_2} + \bar{G} \times g \quad 4-2$$

$g$  – gravitacijska konstanta,  $\text{m/s}^2$

$v_x(t_i)$  – brzine,  $\Delta\psi n$  i  $i=2$  vučnog vozila pri vremenima  $t_{\Delta\psi n}$  i  $t_2$ ,  $\text{m/s}$

Da bi ispitivanje bilo valjano ubrzanje  $a_E$  mora biti u toleranciji  $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$ .

Brzina vožnja za svako ispitivanje treba biti određena prema sljedećoj formuli:

$$\bar{v} = \frac{\int_{t=t_2}^{t_{\Delta\psi n}} v_x dt}{t_{\Delta\psi n} - t_2} \quad 4-3$$

Za prikazivanje prigušenja relativnog zakreta prikolice i vučnog vozila potrebno je definirati sljedeće izraze:

-  $\Delta\psi_1$  – amplituda prve vršne vrijednosti nakon prolaska impulsa upravljača što je obično treća vršna vrijednost, °,

-  $\Delta\psi_n$  – amplituda zadnje vršne vrijednosti za koju vrijedi da je vrijednost  $(\Delta\psi_n \pm \Delta\psi_n)$  barem 10 % vrijednosti  $(\Delta\psi_1 \pm \Delta\psi_2)$ , °,

-  $\Delta\psi_2$  do  $\Delta\psi_{n-1}$  – uzastopne amplitude vršnih vrijednosti relativnog kuta zakreta vozila i prikolice između  $\Delta\psi_1$  i  $\Delta\psi_n$ , °,

-  $t_{\Delta\psi n}$  vrijeme amplitude  $\Delta\psi_n$ , °,

Glavna vrijednost za odnos amplituda  $\bar{r}$  računa se sljedećim izrazom:

$$\bar{r} = \frac{1}{n-2} \left( \frac{\Delta\psi_1 - \Delta\psi_2}{\Delta\psi_2 - \Delta\psi_3} + \frac{\Delta\psi_2 - \Delta\psi_3}{\Delta\psi_3 - \Delta\psi_4} + \frac{\Delta\psi_3 - \Delta\psi_4}{\Delta\psi_4 - \Delta\psi_5} + \dots + \frac{\Delta\psi_{n-2} - \Delta\psi_{n-1}}{\Delta\psi_{n-1} - \Delta\psi_n} \right) \quad 4-4$$

Prigušenje se računa sljedećim izrazom:

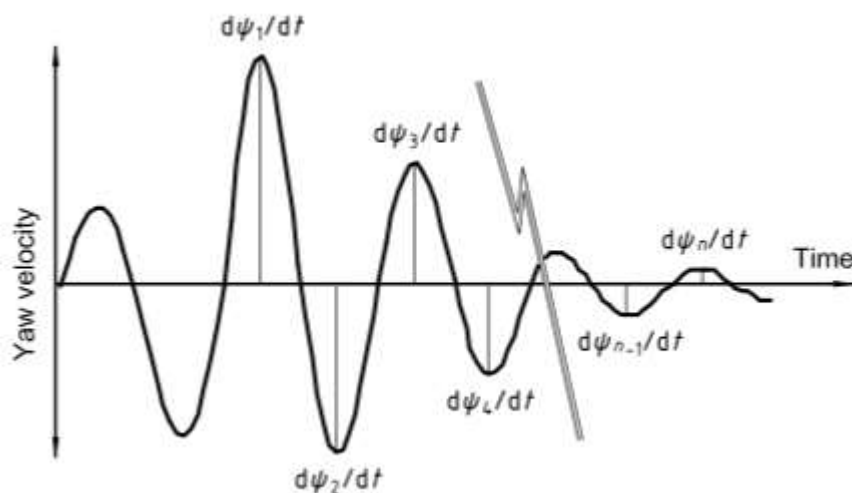
$$D = \frac{\ln \bar{r}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln \bar{r})^2}} \quad 4-5$$

Odnos kutnih brzina oko  $z$  osi prikolice i vučnog vozila računa se sljedećim izrazom:

$$R_{d\psi/dt} = \frac{1}{n-1} \left( \frac{d\psi_{C1}/dt - d\psi_{C2}/dt}{d\psi_{T1}/dt - d\psi_{T2}/dt} + \frac{d\psi_{C2}/dt - d\psi_{C3}/dt}{d\psi_{T2}/dt - d\psi_{T3}/dt} + \frac{d\psi_{C3}/dt - d\psi_{C4}/dt}{d\psi_{T3}/dt - d\psi_{T4}/dt} + \dots + \frac{d\psi_{C(n-1)}/dt - d\psi_{Cn}/dt}{d\psi_{T(n-1)}/dt - d\psi_{Tn}/dt} \right) \quad 4-6$$

$d\psi_{Ci}/dt$  – vršne vrijednosti amplituda brzina zakreta vučnog vozila oko  $z$  osi, °/s,

$d\psi_{Ti}/dt$  – vršne vrijednosti amplituda brzina zakreta prikolice oko  $z$  osi, °/s.



Slika 29. Brzina zakreta vozila i prikolice oko  $z$  osi [28]

Brzina vožnje s prigušenjem jednakim nuli

$$D = C_0 + C_1 \cdot \bar{v} \quad 4-7$$

$C_0$  bezdimenzijski faktor povrata, - ,

$C_1$  faktor povrata – h/km,

$v_{zd} = -\frac{C_0}{C_1}$  , brzina vožnje s prigušenjem jednakim nuli, km/h.

Ispitivanja se trebaju vršiti do barem 90 % brzine vožnje s nultim prigušenjem [28].

#### **4.1.6. Rezultati ispitivanja**

Rezultati ispitivanja prema ovoj normi trebaju biti prikazani grafički s prigušenjem  $D$  u ovisnosti o brzini vožnje  $\bar{v}$  [28].

## **4.2. Osjetljivost na bočne udare vjetra ISO 12021-1996 (2010)**

1.dio Metoda otvorene petlje s generatorom vjetra.

Ovaj dio norme ISO 12021 odnosi se na ispitivanje vozila u otvorenoj petlji prilikom udara bočnog vjetra koji se inicira generatorima vjetra (ventilatorima). Ova metoda odnosi se na osobne automobile prema ISO3833, na osobne automobile s prikolicama te na teretna vozila, a za motocikle se još uvijek ne koristi.

Uvjeti specificirani ovom metodom ne predstavljaju stvarne uvjete na cesti, ali omogućuju objašnjenje ponašanja vozila u uvjetima udara bočnog vjetra[15].

### **4.2.1. Princip testiranja**

Svrha ove metode jest mjerenje osjetljivosti na udar bočnog vjetra pod kojim se vozilo nalazi.

Ova metoda zahtjeva mjerenje određenih veličina na vozilu tijekom pojave udara bočnog vjetra.

Tokom ovog ispitivanja vozilo se vozi ravnom putanjom te u jednom trenutku nailazi na bočni udar vjetra zadan generatorima vjetra. Odaziv vozila na udar vjetra se potom mjeri. Upravljač vozila je fiksiran tokom vožnje.

Mjerenja se mogu vršiti:

- direktnom metodom na način da vozilo ostavlja iza sebe trag na stazi,
- indirektnom preko analiziranja gibanja samog vozila.

Varijable koje se koriste u izračunu odnose se na koordinatni sustav vozila prema ISO 8855 [15].

#### 4.2.2. Varijable

Sljedeće varijable moraju biti mjerene prema ISO 8855:

- kutna brzina zakretanja vozila oko  $z$  osi,  $\dot{\psi}$ , °/s,
- bočno ubrzanje,  $a_y$ , m/s<sup>2</sup>,
- kut zakreta upravljača,  $\delta_H$ , °,
- uzdužna brzina,  $v_x$ , m/s.

Sljedeće veličine mogu, ali ne moraju biti mjerene:

- bočno odstupanje, pomak od pravocrtne linije,  $y$ , mm,
- kut zakreta oko osi  $x$ ,  $\varphi$ , °,
- kut klizanja vozila,  $\beta$ , °,
- bočna brzina,  $v_y$ , m/s [15].

#### 4.2.3. Oprema za mjerenje

Mjerna oprema podliježe raznim pravilima i naknadnim načinima obrađivanja podataka.

Načini mjerenja bočnog pomaka mogu se raditi mjernom opremom na automobilu ili direktnom metodom u kojoj se na vozilo postavlja cijev što bliže  $z$  osi te se ispušta tekućina tijekom testa koja označava kretanje vozila. Tim načinom imamo konkretan rezultat ponašanja vozila.

Prema tablici vidljivi su podaci koji se mjere i u kojim rasponima, također prikazano je i koliku točnost odnosno grešku smije imati mjerena veličina.

**Tablica 2. Mjerene vrijednosti i dopuštene greške[15]**

Varijabla	Područje mjerenja	Maksimalna greška mjernog uređaja
Kutna brzina zakreta vozila oko $z$ osi, $\dot{\psi}$ ,	-10 °/s do +10 °/s	$\pm 0,1^\circ/\text{s}$

bočno ubrzanje, $a_y$	-5 m/s <sup>2</sup> do +5 m/s <sup>2</sup>	$\pm 0,05$ m/s <sup>2</sup>
kut zakreta upravljača, $\delta_H$	-30° do +30°	$\pm 1^\circ$ sa rezolucijom $<0,3^\circ$
uzdužna brzina, $v_x$	0 m/s do 40 m/s	$\pm 0,4$ m/s
bočno odstupanje, pomak od pravocrtne linije, $y$	5 m	$\pm 0,02$ m
kut zakreta oko osi $x$ , $\varphi$	-10° do 10°	$\pm 0,1^\circ$
kut klizanja vozila, $\beta$	-5° do +5°	$\pm 0,2^\circ$
bočna brzina, $v_y$	-10 m/s do +10m/s	$\pm 0,4$ m/s

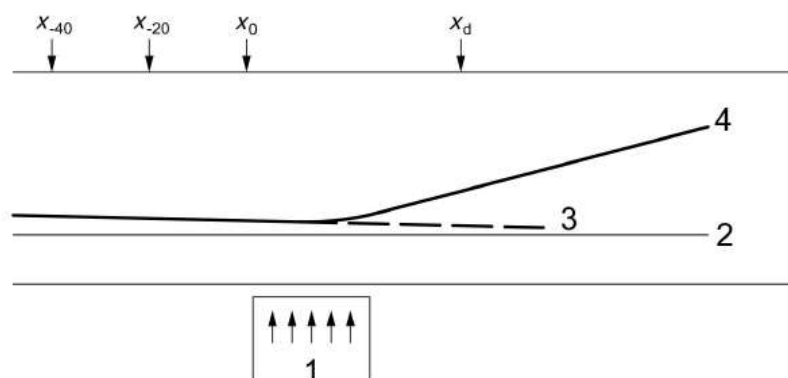
Također je propisana i naknadna obrada podataka te filtriranje istih [15].

#### 4.2.4. Testni uvjeti

Ograničenja i specifikacije ispitivanja vozila te generiranja vjetra strogo su propisani te se treba pridržavati istih tokom testiranja.

Staza treba biti od materijala s visokim faktorom trenja (asfalt, beton itd.) Nagib staze ne smije biti veći od 2,5 % u poprečnom smjeru te u uzdužnom promatrano na udaljenosti od najmanje 50 m. Širina staze treba biti barem 5 m na 100 m prije generatora vjetra te 100m iza generatora vjetra. Širina staze iza generatora vjetra treba biti 7 m.

Vremenski uvjeti trebaju biti bez vjetra odnosno brzina vjetra u bilo kojem smjeru ne smije biti veća od 3 m/s. Staza treba biti suha ili ako je vlažna da ima nemjerljivo malo tekućine. Vremenski uvjeti trebaju biti zapisani kasnije u izvještaju testiranja.



Slika 30. Ispitna staza [15]

Oznake na ispitnoj stazi su sljedeće:



- 1 generator vjetra,
- 2 linija za mjerenje,
- 3 referentna linija,
- 4 putanja vozila,
- $x_{-40}$  mjerna točka na udaljenosti 40 m od početka zone vjetra,
- $x_{-20}$  mjerna točka na udaljenosti 20 m od početka zone vjetra,
- $x_0$  početak zone vjetra,
- $x_d$  udaljenost jednaka 2 s vožnje testnom brzinom nakon početka zone vjetra [15].

#### **4.2.5. Vozilo u ispitnoj proceduri**

Na vozilu je poželjno imati nove gume, odnosno gume ne smiju biti starije od godine dana, a profil gume mora biti na barem 90 % od profila nove gume. Profil gume je propisan kao i tlak u gumama.

Vozilo prije testiranja treba biti pregledano u smislu ispravnosti svih dijelova naročito komponenti ovjesa. Svi podaci kasnije trebaju biti u izvještaju.

Ispitivano vozilo treba biti ispitano s najvećom dopuštenom masom i s minimalnom masom vozila, također je moguće varirati u ispitivanjima u koliko su potrebni neki drugi rezultati.

Generatori vjetra trebaju generirati vjetar brzine od 20 m/s  $\pm 3$  [15].

#### **4.2.6. Ispitna procedura**

Na početku ispitivanja potrebno je da su gume zagrijane s barem 10 prijeđenih kilometara.

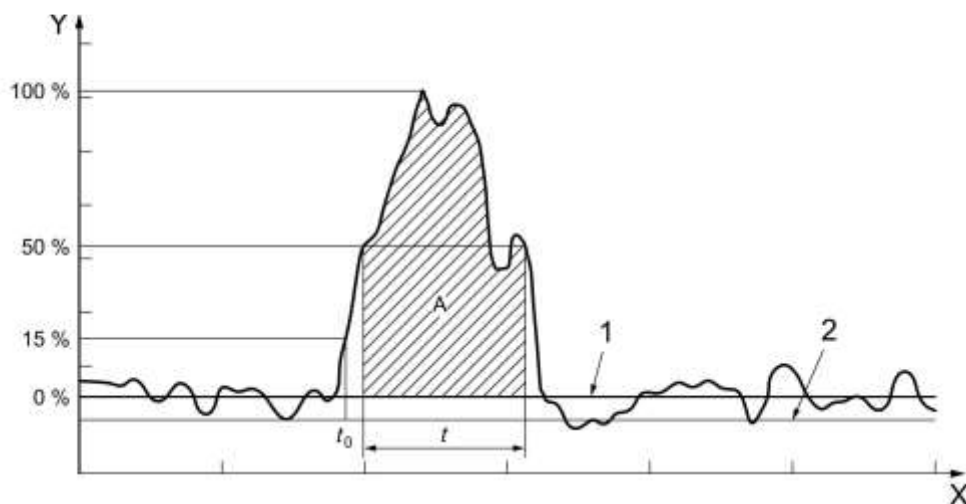
Standardna ispitna brzina je 100 km/h, ali može biti korištena i druga brzina u razmacima po 20 km/h s tolerancijom  $\pm 2$  km/h. Vozilo treba ubrzati na određenu brzinu prije generatora vjetra te potom zadanom položaju pedalu gasa.

Upravljač smije biti korišten u smislu popravljavanja putanje ali ne preko 2° zakreta tijekom 40 m prije generatora vjetra do barem 2 s vožnje ispitnom brzinom nakon početka generatora vjetra. Zakreti upravljača ne smiju prelaziti zadanih 2° sve dok vozilo ne prođe točku  $x_d$ . Da bi se upravljač održavao fiskiran predlaže se dodatna oprema koja to omogućuje. Slična takva oprema prikazana je na slici 4.

Potrebno je minimalno 5 ponavljanja ispitne procedure da bi se prikupljeni podaci mogli analizirati i vrednovati [15].

#### 4.2.7. Analiza podataka

Rezultati trebaju biti prikazivani ili kao vršne vrijednosti ili oscilacijske prema slici.



Slika 31. Oscilacija i vršna vrijednost [15]

-  $x$  - vrijeme

-  $y$  – odazivna vrijednost

-  $A$  – površina

-  $t$  - vrijeme

- oscilacija =  $\frac{A}{t}$  4-8

Ako se podaci prikazuju vršnim vrijednostima širina pojasa vršnih vrijednosti treba biti što manja.

Kutna brzina zakretanja vozila oko  $z$  osi, bočno ubrzanje, brzina vozila su mjerene veličine a kut zakreta oko  $z$  osi, kut klizanja vozila i bočni pomak računaju se pomoću sljedećih izraza:

$$\psi = \int \dot{\psi} dt \quad 4-9$$

$$\beta = \int \left( \frac{a_y}{v_x} - \dot{\psi} \right) dt \quad 4-10$$

$$y = \int [v_x \cdot \sin(\psi + \beta)] dt \approx \int [v_x(\psi + \beta)] dt \quad 4-11$$

Veličine koje se koriste u prethodnim izrazima su sljedeće:

- kutna brzina zakretanja vozila oko z osi,  $\dot{\psi}$ ,
- bočno ubrzanje,  $a_y$ ,
- kut zakreta vozila oko z osi,  $\psi$ ,
- kut klizanja vozila,  $\beta$ ,
- uzdužna brzina,  $v_x$ ,
- bočno odstupanje, pomak od pravocrtne linije,  $y$ .

Kutna brzina zakretanja vozila oko z osi dobiva se mjerenjem u ispitnoj proceduri senzorima koji prate brzinu ili ubrzanje zakreta vozila. Iz te vrijednosti računa se kut zakreta vozila oko osi z. Ove su veličine važne iz razloga što pokazuju tendenciju vozila da se zakrene u odnosu na zadanu putanju, a samim time i da izgubi stabilnost. Kod vozila s prikolicom česta pojava je da se vozilo zakreće u jednu stranu, a prikolica u drugu. Kada ove veličine postanu velike vozilo gubi stabilnost.

Bočno ubrzanje vozila nastaje uslijed određene bočne pobude, a u ovoj proceduri to je pobuda bočnim udarom vjetra. Bočno ubrzanje stvara silu koja nastoji pomaknuti vozilo sa zadane putanje. Uzdužna brzina vozila je brzina kojom se vozilo kreće tijekom vožnje poligonom. Iz ove dvije veličine i kutne brzine zakreta vozila oko z osi dobiva se kut klizanja vozila. Kut klizanja vozila prikazuje kut između usmjerenosti vozila i stvarnog gibanja vozila. Uslijed bočne komponente sile vozilo nastoji ići jednom putanjom a kut između željene i stvarne jest kut bočnog klizanja.

Bočno odstupanje odnosno pomak od pravocrtne linije jest pomak u smjeru y osi. Prilikom bočnog pomaka vozilo zadržava pravac vožnje, ali linija po kojoj se vozilo kreće nakon bočnog pomaka paralelna je s linijom zamišljene putanje kretanja [15].

## 5. Simulacija u programskom paketu CarSim

CarSim je programski paket za analizu dinamike vozila. Za analizu dinamike gospodarskih vozila također postoji programski paket TruckSim istog proizvođača. Program omogućuje simulaciju realnih uvjeta na cesti bez testnog vozila. Danas se još uvijek većina stvari ispituje stvarnim modelima, ali posljednjih godina prisutan je trend sve veće upotrebe računalnih simulacija za analizu dinamike vozila. CarSim odnosno ostali programski paketi ovog karaktera zorno prikazuju utjecaje sila na vozilo te ponašanje vozila i njihovih komponenti. Veliki je broj utjecajnih parametara na samom vozilu. Vozilo se prikazuje kao skup više tijela povezanih određenim relacijama. Odnosi tih povezanih tijela zadani su određenim matematičkim modelima. Neki od odvojenih tijela koji se prikazuju matematičkim modelima su ovjes, upravljački sustav, opružni elementi, prigušni elementi, pneumatici itd. U programu su također opisani razni modeli vozača, modeli ispitnih procedura u kojima su definirane pobude na vozilo itd.



Slika 32 . Glavno korisničko sučelje programskog paketa, CarSim

U glavnom izborniku programskog paketa CarSim osnovne postavke su:

- *Vehicle configuration*, gdje se podešavaju parametri vozila,
- *Procedure*, gdje se mijenjaju i podešavaju ispitne procedure,
- *Run Math Model*, služi za pokretanje matematičkog modela,
- *Animate*, služi za animaciju ispitne procedure s vozilom prema podešenim parametrima,

- *Plot*, služi za izradu dijagrama, odnosno prikazivanje rezultata.

Prikazane postavke osnovne su za rad u programu, a dalje se nadovezuju dodatne mogućnosti promjene parametara, uređenja animatora itd.

### 5.1. Model vozila

Za vučno vozilo, korišteno u ispitivanja, odabrano je terensko motorno vozilo s otvorenim tovarnim prostorom. Vozilo u simulacijskom modelu jest teretno vozilo sa stražnjim pogonom, neovisnim prednjim ovjesom te ovisnim stražnjim ovjesom. Ovo vozilo pokazalo se kao idealno za vuču prikolice iz razloga što je predviđeno za vuču prikolica i konstrukcijski pripremljeno i za teže zadatke glede vuče prikolica. Na samo model vučnog vozila nije se previše obraćalo pozornosti, iz razloga što je primarno promatrano ponašanje prikolice, te su mijenjani samo neki parametri da bi se vozilo prilagodilo simulaciji. Podešavani su parametri aerodinamičkog težišta vozila, visine vozila i sl.



**Slika 33. Terensko motorno vozilo s otvorenim tovarnim prostorom, CarSim**

### 5.2. Model prikolice

Za model prikolice korištena je prikolica sa zatvorenim tovarnim prostorom. Ovakav model prikolice korišten je zbog toga što je na njemu moguće ostvariti značajan utjecaj bočnog udara vjetra zbog velike bočne površine tovarnog prostora. Na samoj prikolici mijenjani su parametri koji su vezani za samu konstrukciju prikolice i parametri koji su vezani za položaj, masu, raspored tereta. Mijenjani parametri vezani za prikolicu su:

- Masa tereta,
- Položaj tereta u smjeru osi  $x$  i  $y$ ,
- Bočna površina prikolice,
- Širina traga kotača.



**Slika 34. Prikolica sa zatvorenim tovarnim prostorom, CarSim**



**Slika 35. Model vozila s prikolicom korišten u simulaciji, CarSim**

### **5.3. Opis ispitne procedure u CarSim-u**

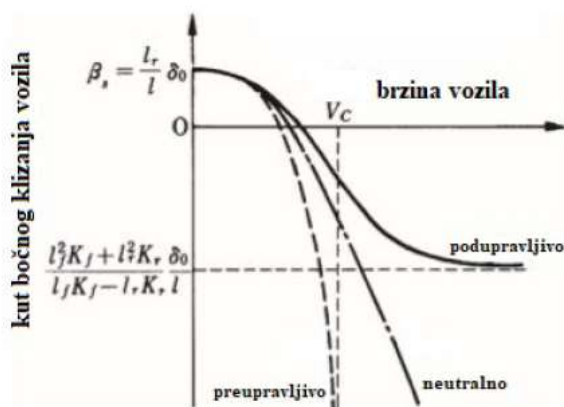
U sklopu rada odrađeno je više ispitivanje u više različitih ispitnih procedura. Ispitne procedure koje su razmatrane u radu su sljedeće:

- kružna ispitna procedura za podupravljanje vozila,
- ispitna procedura s bočnom pobudom vjetra,
- ispitna procedura impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu.

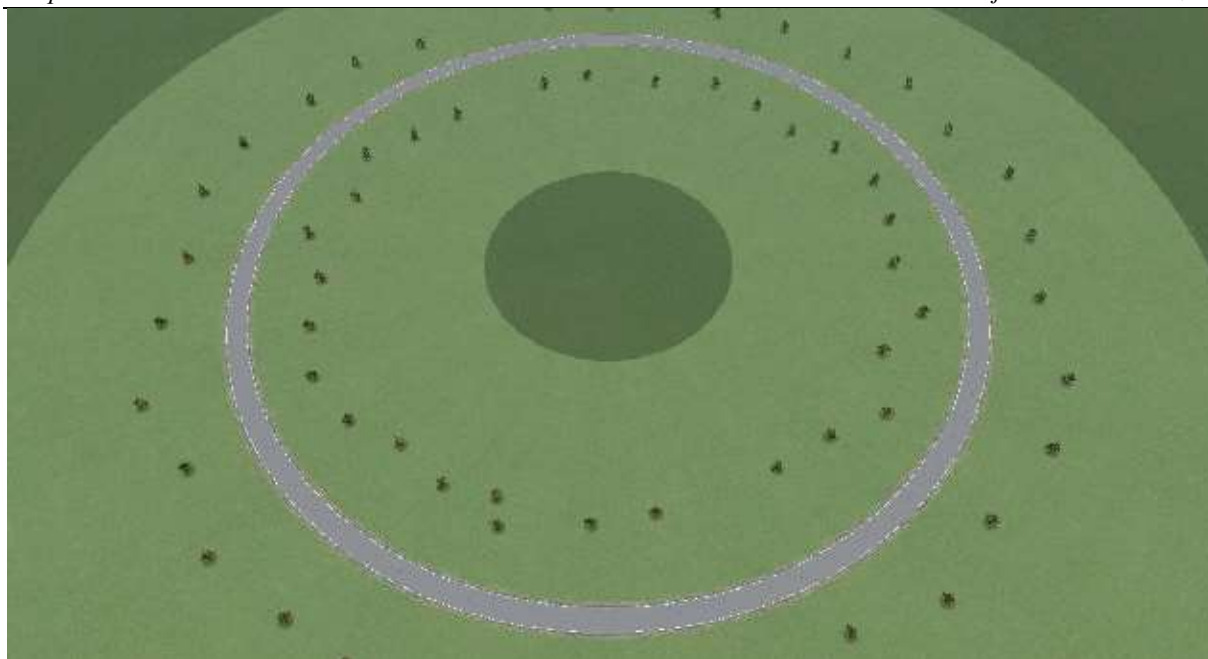
**5.3.1. Kružna ispitna procedura za podupravljanje vozila prema normi ISO 4138*****Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods***

U ovoj ispitnoj proceduri vozilo s prikolicom vozi po zadanoj kružnoj stazi. Vozilo kreće s brzinom 0 km/h te postepeno ubrzava, potom se bilježi koliko on odstupa, pri određenoj brzini, od zadane putanje. Vozilo prolaskom kroz zavoj u određenom trenutku ima određenu brzinu koja na određenom radijusu rezultira centrifugalnom silom. Da bi vozilo uspješno prolazilo kroz zavoj na pneumaticima se javlja bočna sila koja je reakcija na centrifugalnu silu. Porastom centrifugalne sile rastu i sile na pneumaticima te se povećava kut bočnog klizanja vozila  $\beta$ . U slučaju kada se granica ostvarive bočne sile na pneumaticima javi na prednjoj osovini, tada je riječ o podupravljivom vozilu. Tada se vrijednost kuta bočnog klizanja  $\beta$  smanjuje na minimum, a to za rezultat ima smanjenje bočnog ubrzanja te smanjenje kutne brzine oko vertikalne osi  $z$ . Povećava se radijus kretanja, a posljedica toga je stabilizirajući efekt na vozilo.

U slučaju kada se granica ostvarive bočne sile ostvari na stražnjoj osovini tada je riječ o preupravljivom vozilu. U tom slučaju također se smanjuje kut bočnog klizanja, ali teži prema  $\infty$ . Brzina pri kojoj vozilo dostiže tu vrijednost naziva se kritična brzina vozila, a kutna brzina vozila kod kritične brzine vozila ide u beskonačnost. Preupravljivost vozila iz ovih razloga ima destabilizirajući efekt na vozilo [24].



**Slika 36. Promjena kuta bočnog klizanja u odnosu na brzinu vozila [24]**



**Slika 37 . Kružna staza, CarSim**

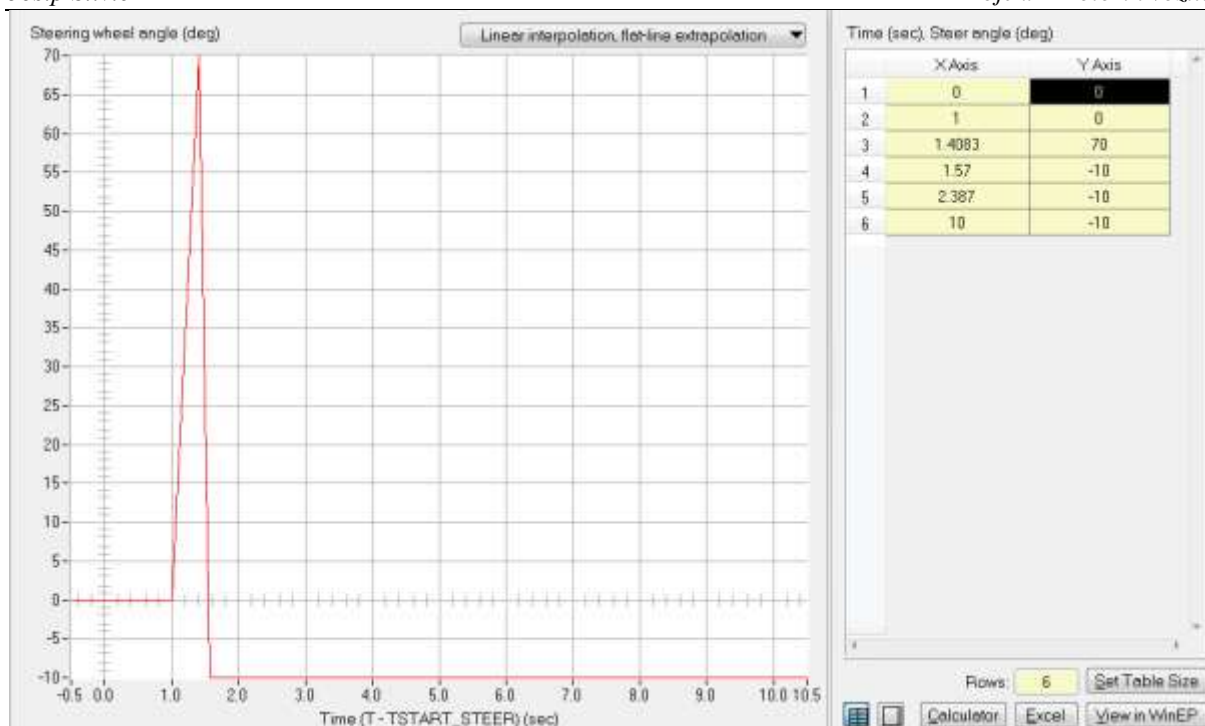
### **5.3.2. Ispitna porcedura s impulsnom pobudom na vučnom vozilu prema (4.1)**

U ovoj ispitnoj proceduri vozilu se zadaje pokret na upravljaču takav da, kao i u normi (4.1), vozilo u odnosu na prikolicu krene oscilirati. Pokret upravljača zadaje se u jednom smjeru te se odmah potom zadaje pokret upravljača u suprotnom smjeru. U takvim okolnostima vozilo i prikolica krenu u osciliranje u kom se kut između vozila i prikolice smanjuje, ako je stabilan slučaj. U nestabilnom slučaju raste kut između vozila i prikolice, koji predstavlja relativno gibanje vozila i prikolice.

Prema normi razmatraju se samo stabilni slučajevi, a u simulaciji u programskom paketu CarSim analizirani su također i nestabilni slučajevi.

Pokret upravljačem zadaje se iterativnim postupkom (Slika 38), na način da se izvede simulacija s pretpostavljenim vrijednostima zakreta upravljača, a nakon toga, prema rezultatima u dijagramima, gleda se iznos bočnog ubrzanja te se kut zakreta upravljača povećava ako se nije ostvarila dovoljna oscilacija, a smanjuje se ako je bočno ubrzanje preveliko. U slučaju kada je preveliko bočno ubrzanje, vozilo i prikolica vrlo brzo izgube stabilnost, bez ikakve pojave osciliranja. Prema slici 38. vidljivo je da se zakret upravljača zadaje u vrlo kratkom vremenu da bi se dobilo zahtjevano ponašanje vozila i prikolice.





**Slika 38. Primjer izbornika u kojem se zadaje impuls zakreta upravljača, CarSim**

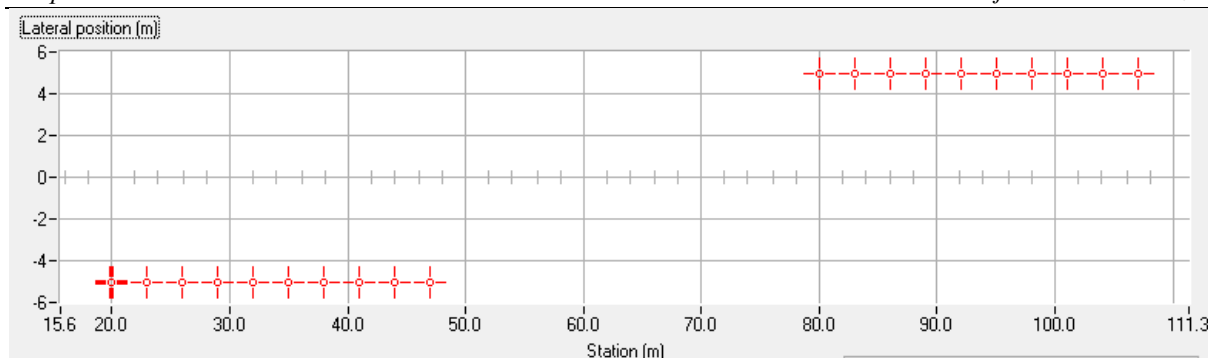
Nakon što se provede iterativni postupak zadavanja impulsne pobude upravljača, pristupljeno je izmjeni parametara prikolice i ispitne staze, kao i u drugim ispitnim procedurama, te su razmatrani utjecajni parametri.

### 5.3.3. Ispitna procedura s bočnom pobudom vjetra

U sklopu ovog rada odrađen je izvjestan broj simulacija u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra. U samoj ispitnoj proceduri zadan je vjetar brzine 100 km/h te raspored generatora vjetra kao na slici 40.

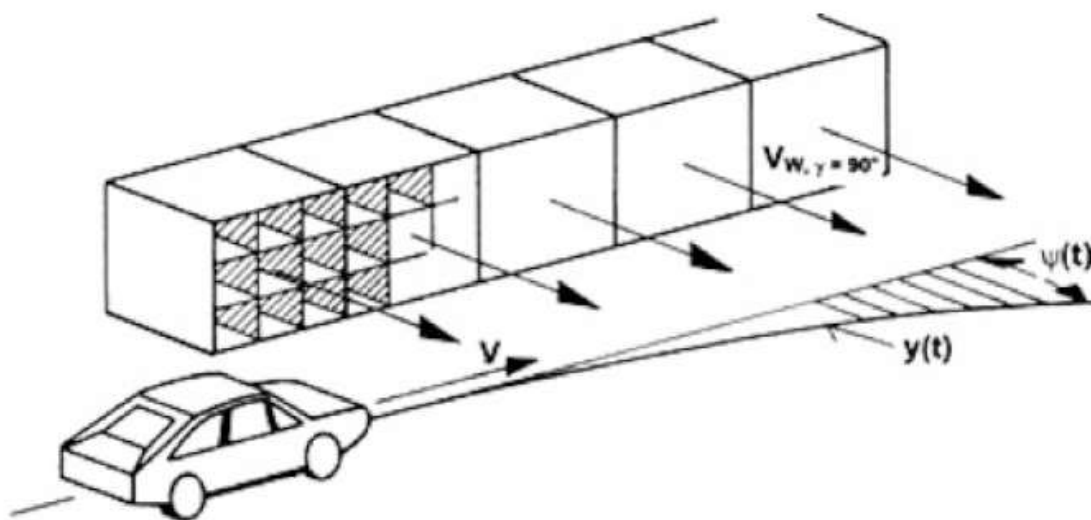


**Slika 39. Prikaz ispitne procedure te parametara staze, CarSim**



**Slika 40. Pozicija generatora vjetra, CarSim**

Na slikama (Slika 39., Slika 40.) prikazan je poligon vožnje u programskom paketu CarSim. Na slici 41. prikazan je teorijski model vozila u pokretu s bočnom pobudom vjetrom, koji se uvelike ne razlikuje od simulacijskog modela. Na slici 42. prikazani su stvarni generatori vjetra u realnim ispitnim uvjetima. Na slici su prikazani generatori vjetra postavljeni pod određenim kutem, različitim od  $90^\circ$ , u odnosu na poligon, dok su u trenutnom postavi na slici 39. prikazani generatori vjetra postavljeni okomito na poligon. Generatori vjetra mogu biti postavljeni pod kutem i u simulaciji što je kasnije i prikazano.



**Slika 41. Skica vozila u pokretu sa bočnom pobudom vjetrom [5]**



**Slika 42. Stvarni generatori vjetra koji se koriste u realnim ispitivanjima vozila u ovoj ispitnoj proceduri [2]**

U samoj ispitnoj proceduri zadaje se broj ventilatora, širina staze na kojoj je ispitivano vozilo, duljina staze, položaj ventilatora, smjer vjetra, brzina vjetra, trenje prijanjanja na podlogu itd. Prethodno nabrojani parametri mijenjani su na načine prikazane kasnije u provedenim simulacijama te se s promjenom tih parametara utjecalo na stabilnost vozila i prikolice.

#### **5.4. Utjecaj parametara prikolice i parametara ispitne procedure na rezultate ispitivanja**

Razmatrani utjecajni parametri u simulaciji u CarSim-u su sljedeći:

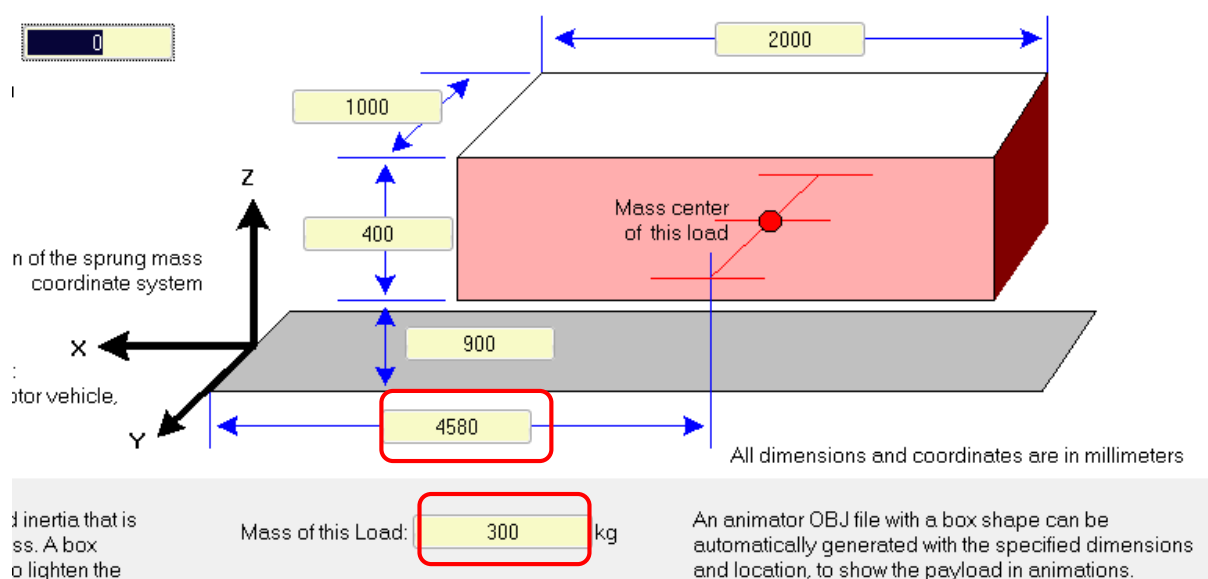
- masa tereta,
- položaj težišta tereta u odnosu na  $x$  ili  $y$  os,
- brzina vožnje,
- trenje u odnosu na podlogu,
- brzina udara vjetra,
- širina traga kotača,
- kut udara vjetra,
- bočna površina prikolice.

### 5.4.1. Utjecaj mase tereta na prikolici

U ovom ispitivanju razmatrani su utjecaji sljedećih masa:

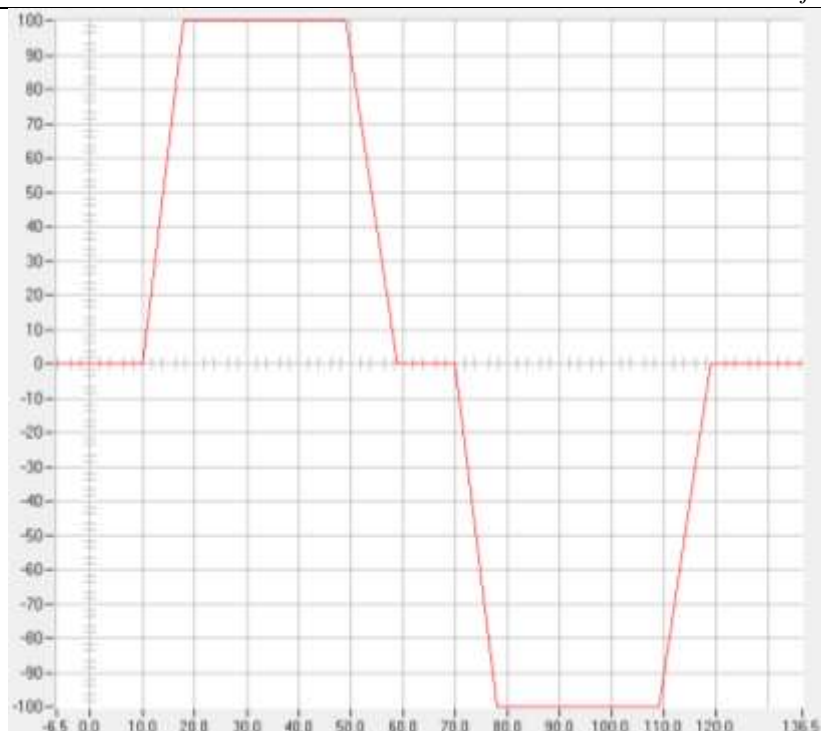
- $m_1=3000\text{kg}$ ,
- $m_2=2000\text{kg}$ ,
- $m_3=1000\text{kg}$ ,
- $m_4=300\text{kg}$ .

Na slici ispod vidljiva je masa tereta, te položaj tereta u smjeru osi  $x$ .



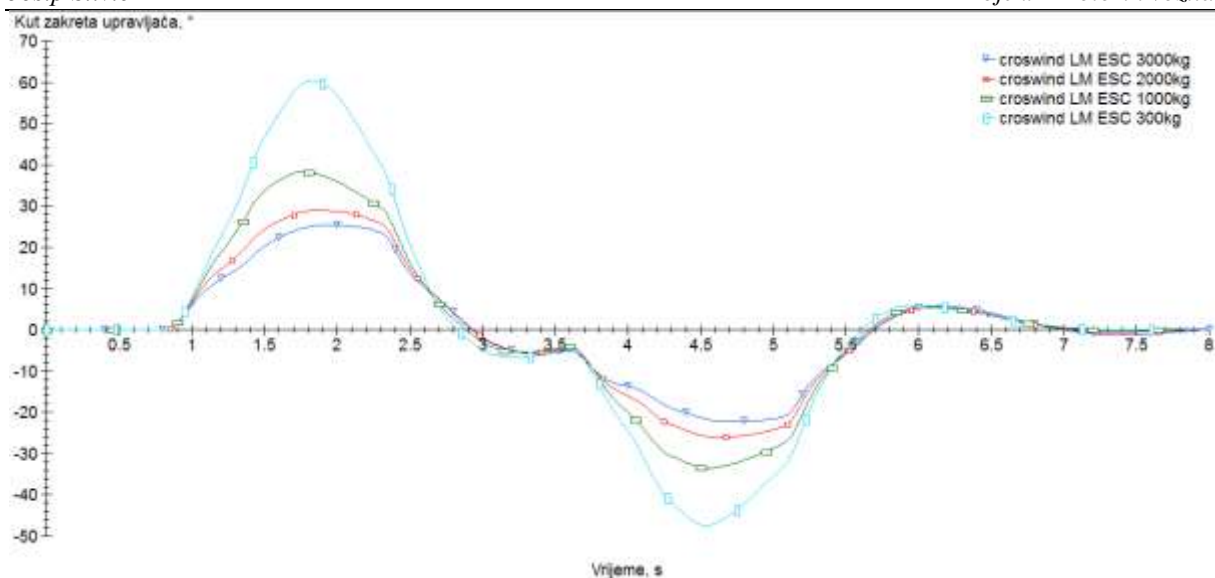
**Slika 43. Masa tereta, CarSim**

Razmatrana je brzina vozila od 78 km/h da bi se zorno prikazao gubitak stabilnosti vozila s najmanjim teretom na prikolici. Faktor trenja podloge iznosa  $\mu = 1$  korišten je u ovoj simulaciji. Udar vjetra je kao i u većini ispitivanih slučajeva 100 km/h. Iz dijagrama na slici 44. vidljiv je intenzitet vjetra te smjer udara vjetra na vozilo. Generatori vjetra postavljeni su okomito na smjer vožnje vozila.

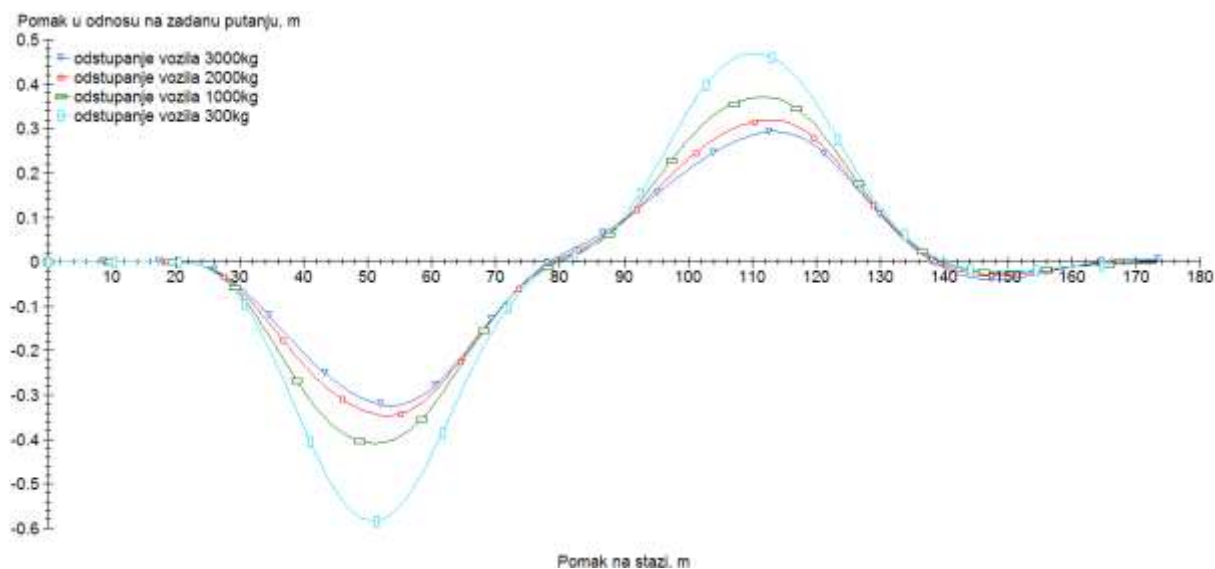


**Slika 44. Intenzitet vjetra na generatorima vjetra**

Uzrok gubitka stabilnosti vozila s najmanjim teretom jest zbog stvaranja velikog zakretnog moment oko  $z$  osi vozila, uslijed udara bočnog vjetra. Tom momentu suprotstavlja se bočna sila na kotačima koja je određena faktorom trenja te normalnom silom na podlogu. Normalna sila na podlogu jest ukupna masa prikolice koja je u slučaju vuče prikolice s teretom 300 kg najmanja. Prema slikama (Slika 45., Slika 46., Slika 47.) vidljiv je utjecaj mase tereta na stabilnost vozila s prikolicom. Prema dijagramima vidljivo je da s većim bočnim pomacima vozila i prikolice vozač mora djelovati na upravljač vozila da bi vozilo održao na zadanoj putanji.

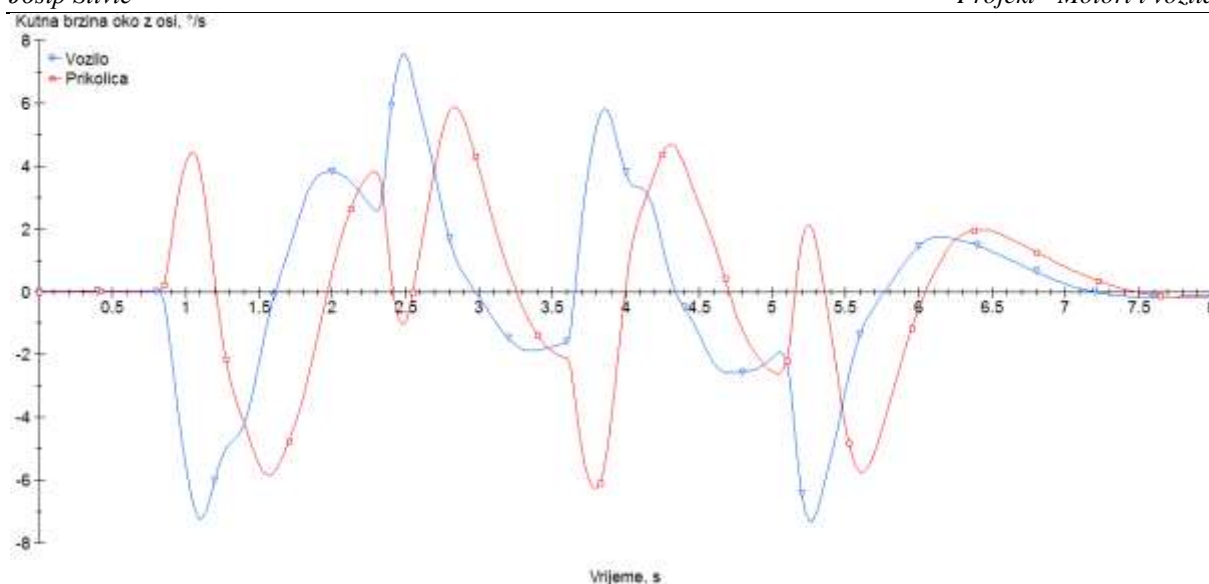


**Slika 45. Utjecaj različitih masa tereta na kut zakreta upravljača vozila u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim**



**Slika 46. Utjecaj mase na bočni pomak vozila s prikolicom u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim**

Sa slike 47. vidljivo je da se na vučnom vozilu javljaju veće kutne brzine, a razlog tome je utjecaj duljine prikolice te krak na kojem udar vjetra djeluje na vozilo i prikolicu. Također je zanimljivo da se prilikom udara vjetra vozilo i prikolica zakreću u suprotnu stranu oko z osi. Razlog tome je različit položaj aerodinamičkog težišta vozila u odnosu na stvarno težište vozila. Prema ovim dijagramima vidljiv je pozitivan utjecaj velike mase, pravilno raspoređene, na stabilnost vozila s prikolicom u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra.



**Slika 47. Kutna brzina vozila i prikolice (teret 1000kg) u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra, CarSim**

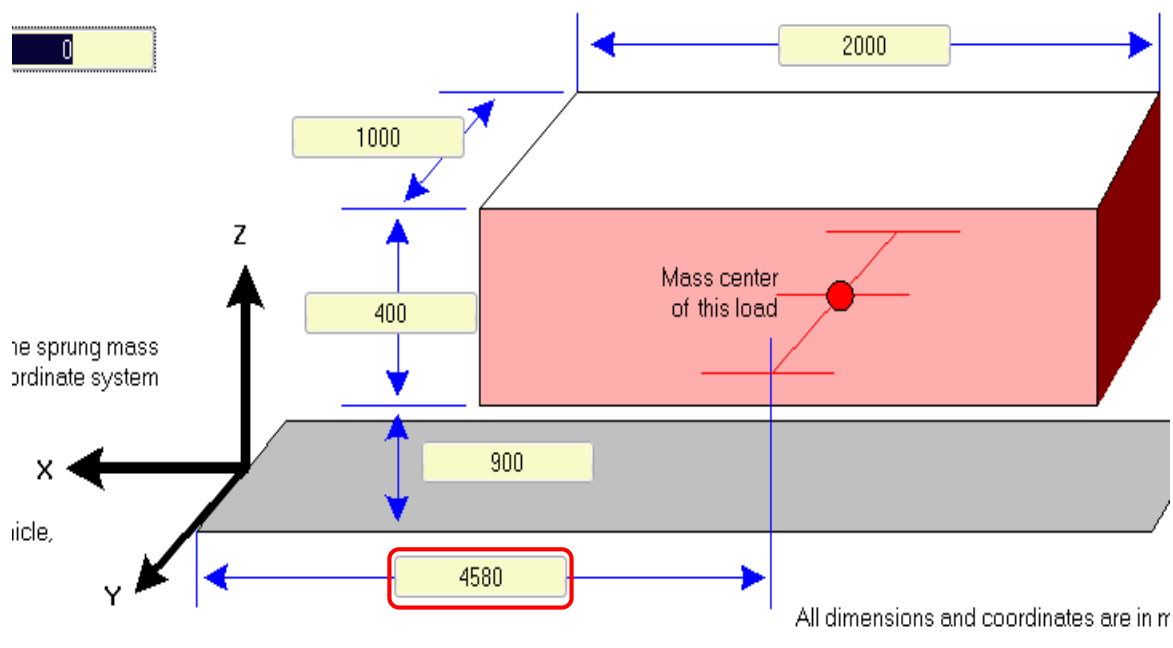
#### 5.4.2. Utjecaj položaj težišta tereta na prikolici u smjeru osi $x$

Položaj tereta na prikolici iznimno je važan naročito kada su u pitanju velike mase tereta. U simulaciji je prikazan utjecaj položaja tereta. Razmatranjem rezultata simulacija može se izvući zaključak da teret koji se nalazi bliže vučnom vozilu odnosno kuki vozila daje bolje rezultate glede stabilnosti u razmatranoj ispitnoj proceduri. U nekim drugim uvjetima vožnje u kojima bi teret previše opteretio stražnju stranu vozila, prethodno objašnjenim postavljanjem tereta, vozilo bi jednostavno iskliznulo iz zavoja jer bi izgubilo normalnu silu na prednjem kraju vozila na kojem je upravljanje.

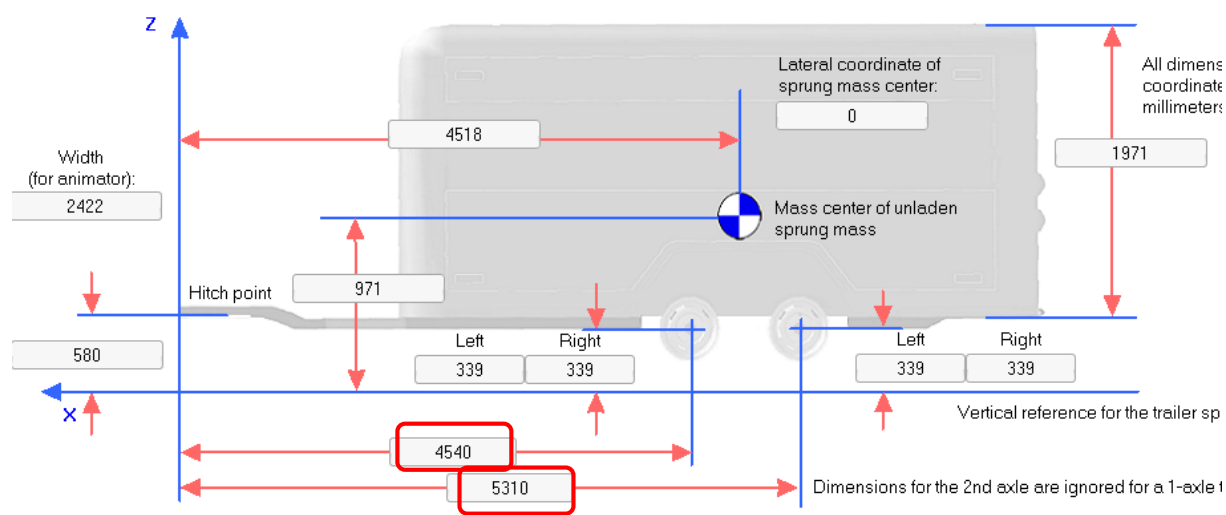
Na slici 48. prikazan je položaj tereta 1 na prikolici u izvedenoj simulaciji. Masa tereta u simulaciji jest 2000kg, a ostali parametri zadržani su iz simulacije u kojoj se razmatrala masa tereta. Razmatrani položaji tereta su:

- $x_1 = 3000$  mm,
- $x_2 = 4850$  mm,
- $x_3 = 5320$  mm.





**Slika 48. Položaj tereta 1 na prikolici u smjeru x osi, CarSim**



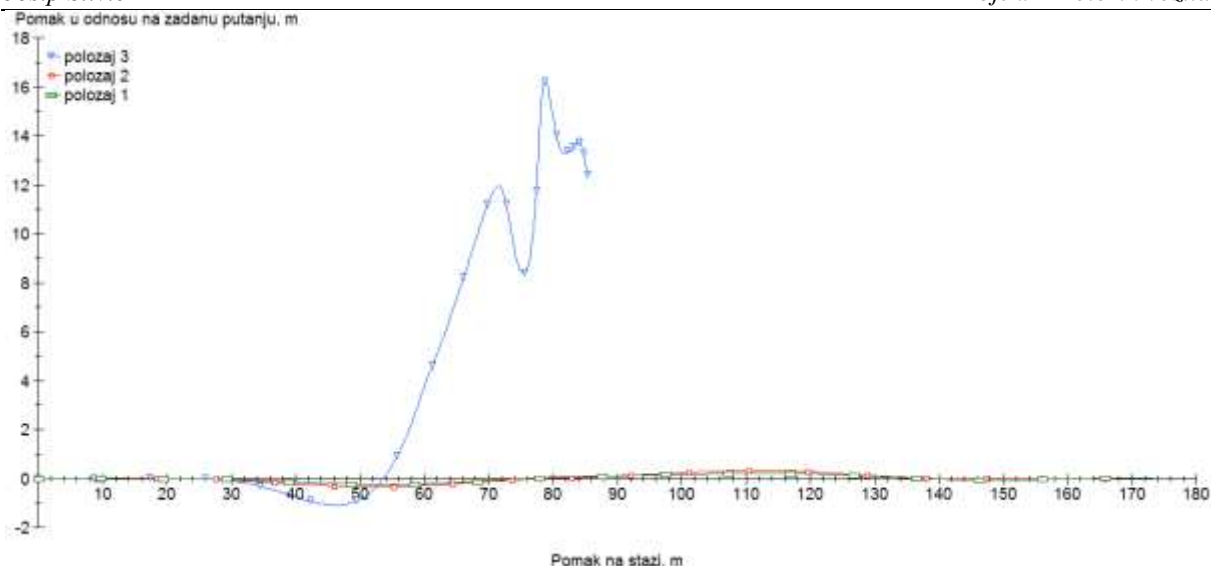
**Slika 49. položaj osovina prikolice u odnosu na kuku vozila, CarSim**

Iz prethodnih slika vidljiva je razlika u položaju tereta koja je korištena u simulaciji. Prema slici 49. vidljiv je položaj osovina prikolice, što je važno za razmatranje utjecaja položaja tereta. Važno je ispitati sva tri slučaja, slučaj u kojem je težište tereta između osovina prikolice i slučaj u kojima je teret s jedne ili druge strane osovina prikolice.

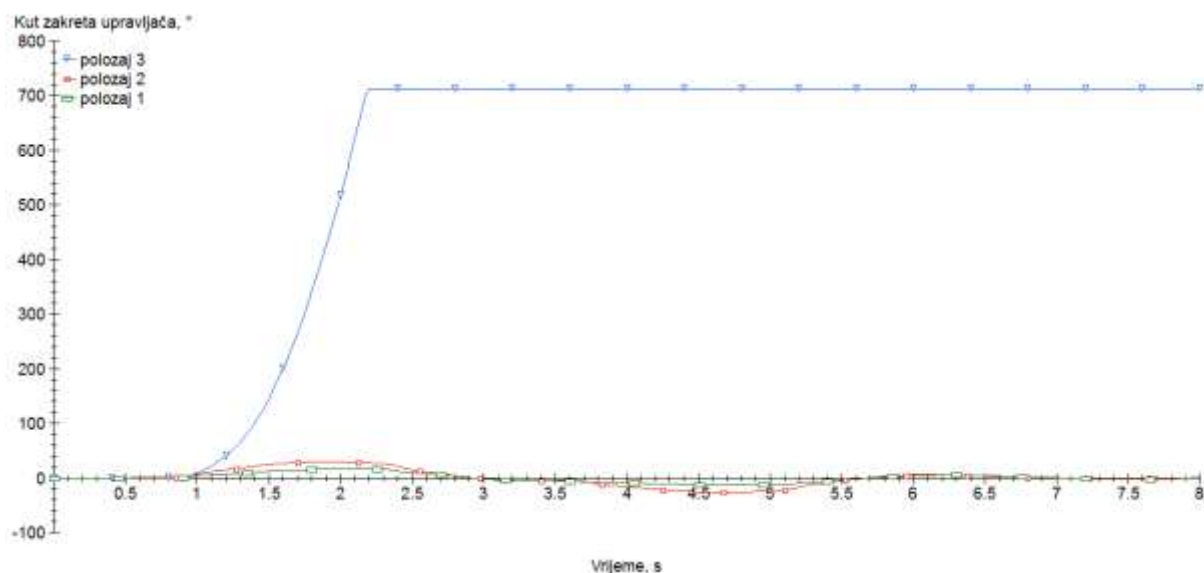
Na velikim prikolicama teret je moguće pozicionirati na razne načine. Važno je da teret bude pravilno pozicioniran, a to pokazuju i rezultati ove simulacije.

Prethodno prikazani položaji tereta na vozilu u simulaciji su prikazali sljedeće rezultate vidljive na slici 50.





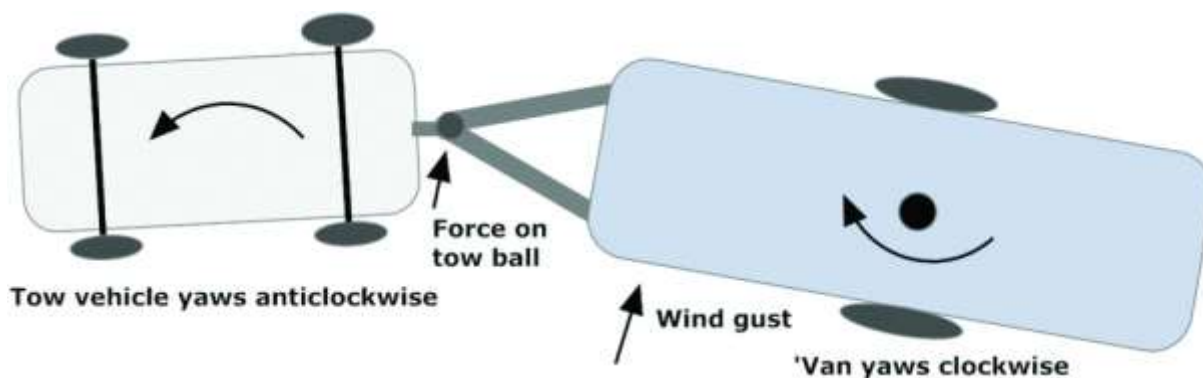
**Slika 50. Utjecaj položaja tereta na prikolici – pomak od zadane putanje, CarSim**



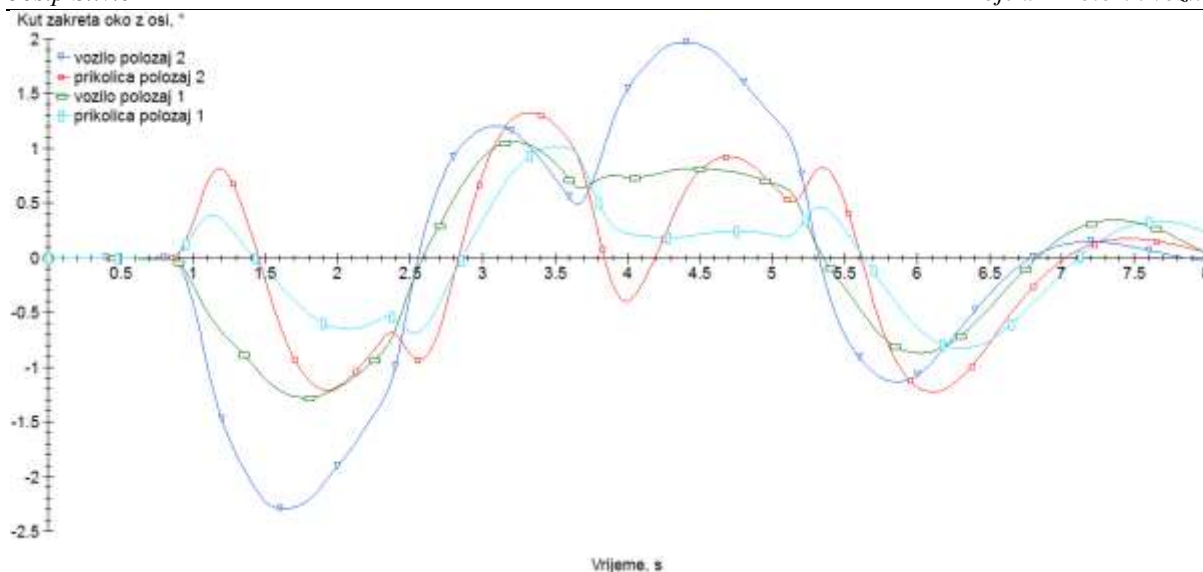
**Slika 51. Zakret upravljača za različite položaje tereta, CarSim**

Na slici 50. vidljiv je utjecaj položaja tereta na stabilnost. U prva dva slučaja vozilo je stabilno prošlo kroz poligon. Položaj tereta  $x_1$  na kojem je teret postavljen bliže kuki pokazao se stabilnijim od tereta s položajem daljim od kuke. Teret bliže kuki opterećuje stražnju osovinu vozila više nego u slučaju  $x_2$  te samim time stvara veću silu trenja na stražnjim kotačima. Sila trenja na stražnjim kotačima vučnog vozila važna je zbog toga što udar vjetra pokušava zakrenuti prikolicu i vozilo oko težišta svakog zasebnog vozila. Prema slici 52. vidljivo je da se vučno vozilo u ovakvim okolnostima bočne pobude zakreće obrnuto od kazaljke na satu, a prikolica u smjeru kazaljke na satu. Sa tog dijagrama vidljivo je da stražnja osovinu vučnog vozila daje najveću reakciju glede bočne pobude. Sila koja stabilizira stražnju osovinu uslijed bočne pobude jest sila trenja, a ona je ekvivalentna umnošku faktora trenja podloge i gume i

ukupnoj masi na stražnjoj osovini. Iz ovog razloga povoljno je da teret bude smješten što bliže stražnjoj osovini vučnog vozila. Problem sa smještanjem tereta bliže stražnjoj osovini vozila nastaje ukoliko se veliki tereti smjeste na takvu poziciju te rasterete prednji kraj vozila, tada vozilo gubi stabilnost uslijed prolaska kroz zavoj. Još jedan problem javlja se smještanjem tereta bliže vozilu, a to je problem preopterećenja vučne kuke vozila. Vučna kuka vozila ima propisani teret koliki smije preuzeti, a tako i stražnja osovina vozila. Sa slike 51. također je vidljivo da vozač radi veći pomak upravljačem da bi vozilo održao na zadanoj putanji, kod tereta postavljenog dalje od vučne kuke. Zbog krivog položaja tereta na stražnjoj osovini djeluje manja reakcija na bočnu pobudu stoga se javlja veći zakret vozila i prikolice (Slika 53. Slika 52). Uslijed većeg zakreta vučnog vozila vozač mora, da bi vozilo zadržao na putanji napraviti veći pokret upravljačem nego u slučaju manjeg zakreta vozila. Prema istoj slici vidljivo je da vozilo ima veći kut zakreta nego prikolica. Ta pojava slijedi iz same konstrukcije prikolice odnosno vozila. Ako se uzme u obzir da se vozilo nastoji zakrenuti oko nekakvog težišta tada sam krak na kojem djeluje bočna sila manji je nego na prikolici (Slika 52.). Mali kutni pomak prikolice zbog većeg kraka stvara veći kutni pomak na vozilu, što naravno vrijedi isključivo u slučaju većih prikolica, a kod manjih je suprotan efekt.



Slika 52. Zakret vozila i prikolice uslijed udara bočnog vjetra [19]



**Slika 53. Kut zakreta vozila oko osi  $z$  (yaw), CarSim**

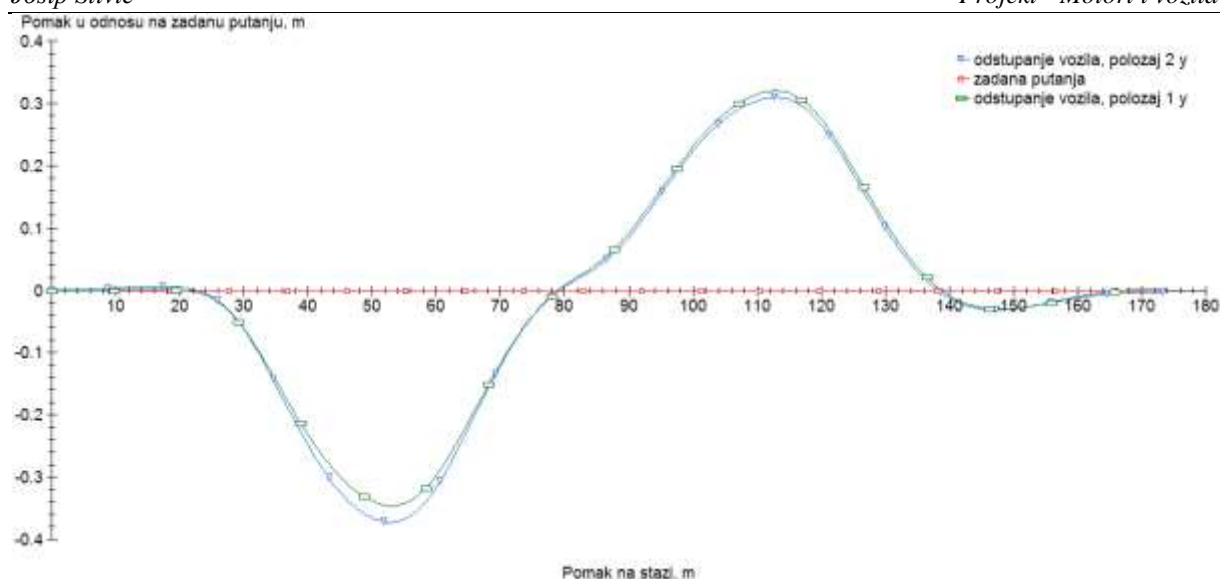
Prema rezultatima simulacija vidljivo je da je vozilo stabilno u uvjetima postavljanja tereta između težišta stražnjih osovine i vučne kuke, a teret postavljen iza stražnje osovine stvara iznimno nestabilnu vožnju vozila s prikolicom. Nestabilnost prikolice s teretom iza stražnje osovine raste ekstremno.

#### 5.4.3. Utjecaj položaja tereta u smjeru osi $y$

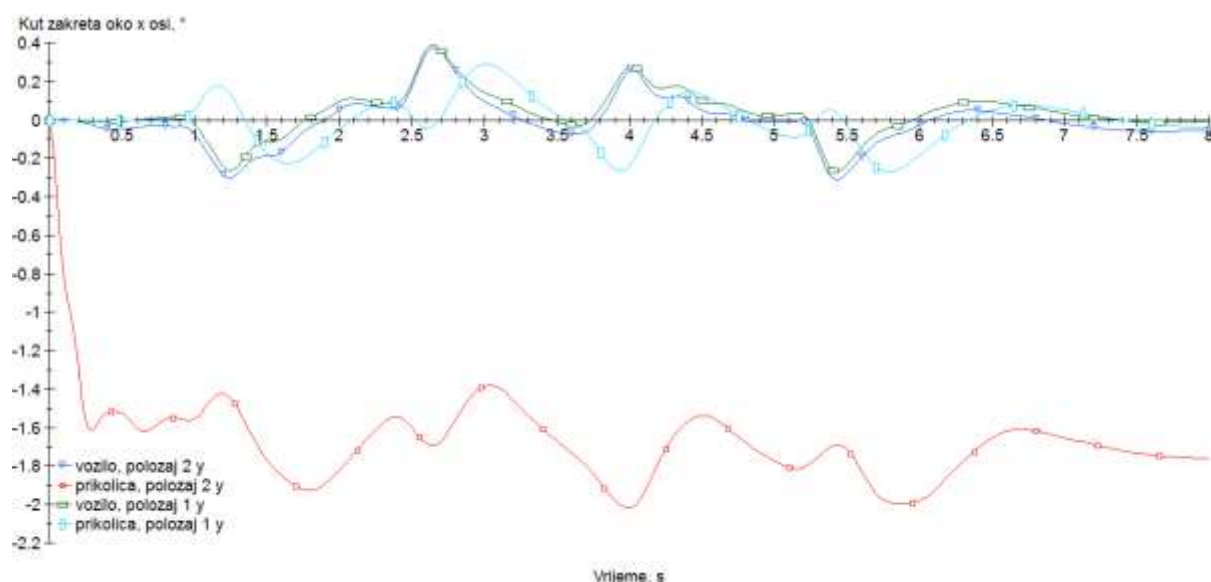
Konfiguracije položaja tereta smještenog u  $y$  smjeru su:

- $y_1 = 0$ ,
- $y_2 = 800$  mm.

Položaj tereta u smjeru osi  $y$  također ima utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom, te u kritičnim uvjetima može dovesti do potpunog gubitka stabilnosti. Za razliku od položaja tereta u smjeru osi  $x$ , položaj tereta u smjeru osi  $y$  nema toliko značajan utjecaj na bočni pomak i zakret oko  $z$  osi, ali na zakret oko  $x$  osi ima primjetan utjecaj, premda sami kut zakreta i nije toliko značajan. Prema slici 55. vidljiv je utjecaj položaja tereta na zakret oko  $x$  osi. Teret koji se postavlja prema bočnim stranama prikolice, nepravilno opterećuje samu prikolicu. Razlog tome je što se stvara veća normalna sila na kotaču bliže kojeg se nalazi teret. Bočni udar vjetra nastoji zakrenuti vozilo oko točke koja se nalazi u kontaktu kotača i podloge, na strani prikolice na koju ne udara vjetar. Ako se na toj strani dodatno optereti kotač, nikakva sila ne može kontrirati sili udara vjetra, tada se prikolica nalazi u nestabilnim uvjetima te može doći do prevrtanja. U slučaju kada je teret postavljen na strani na kojoj udara vjetar, tada se prikolica nalazi u povoljnijoj situaciji. U prosječnoj vožnji vozilo se nalazi u raznim situacijama gdje vjetar nekontrolirano udara s bilo koje strane, tako da je ispravno postaviti teret na sredinu prikolice u smjeru  $y$  osi.



Slika 54. Utjecaj položaja tereta, u smjeru y osi, na pomak u odnosu na zadanu putanju, CarSim



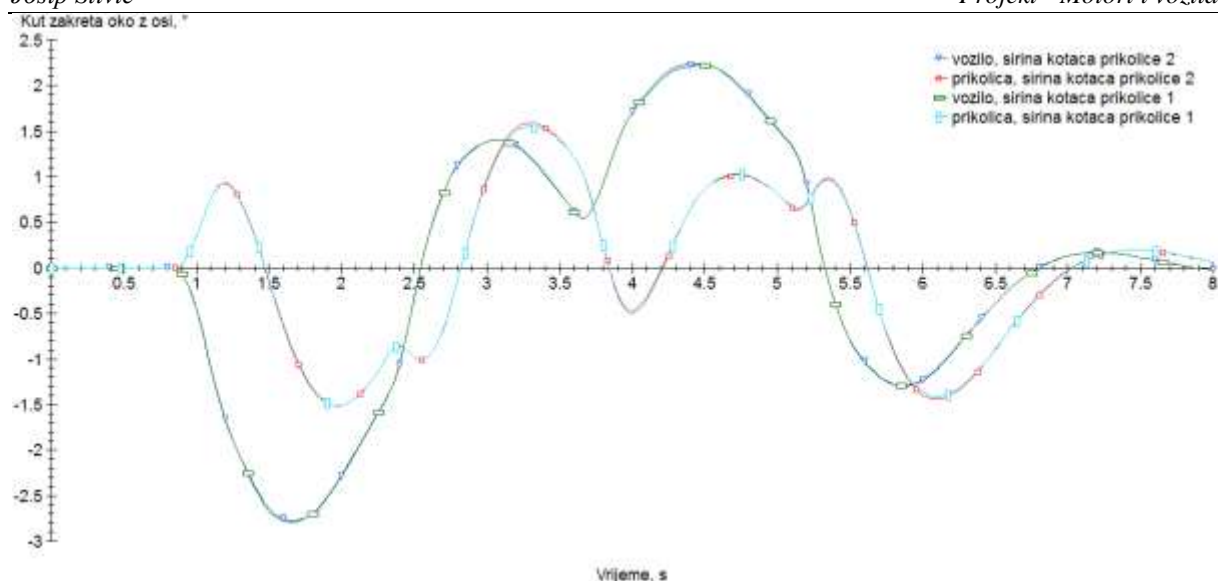
Slika 55. Utjecaj položaja tereta u smjeru y osi, na kut zakreta oko x osi, CarSim

#### 5.4.4. Utjecaj širine traga kotača na prikolici

U ovom poglavlju razmatrana je širina traga kotača. Razmatrane su dvije konfiguracije širine traga kotača:

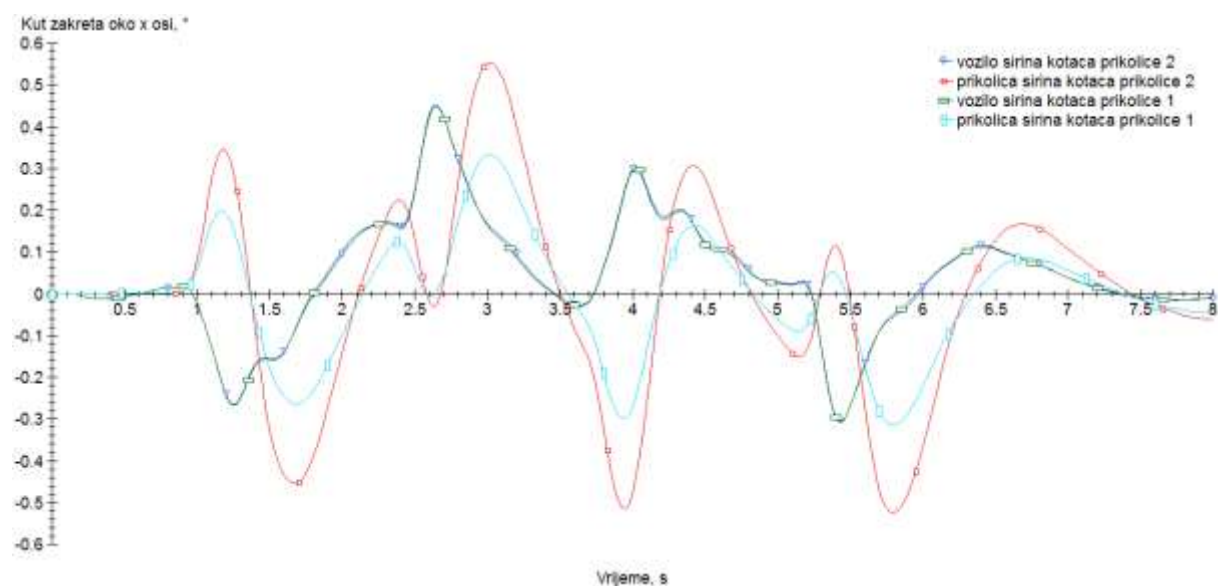
- $b_1 = 2170$  mm,
- $b_2 = 1500$  mm.

Utjecaj širine traga kotača u simulaciji nije se pokazao utjecajnim na bočni pomak od zadane putanje, također niti na zakret oko vertikalne osi vozila. Tek male oscilacije u zakretu oko vertikalne osi uočene su u dijagramu.



**Slika 56. Zakret oko z osi - utjecaj širine kotača**

Utjecaj širine traga na zakret oko  $x$  osi (*Roll*) pokazao se vrlo utjecajnim. Prema slici 57. vidljivo je da bočna pobuda stvara znatno veći zakret na prikolici širine traga kotača 1500 mm, a da vučno vozilo ima male razlike u zakretu. Veće razlike u zakretu oko  $x$  osi na prikolici se javljaju baš iz razloga što je na prikolici mijenjana širina traga kotača. U oba slučaja ostali parametri vozila i prikolice nisu mijenjani. Masa tereta na prikolici je 2000 kg koja ima težište relativno nisko na samoj prikolici te stvara reakcijski moment na zakret oko  $x$  osi. Kada bi bio razmatran slučaj bez tereta na prikolici, s malim tragom kotača, vozilo bi lakše izgubilo stabilnost (Slika 6.).

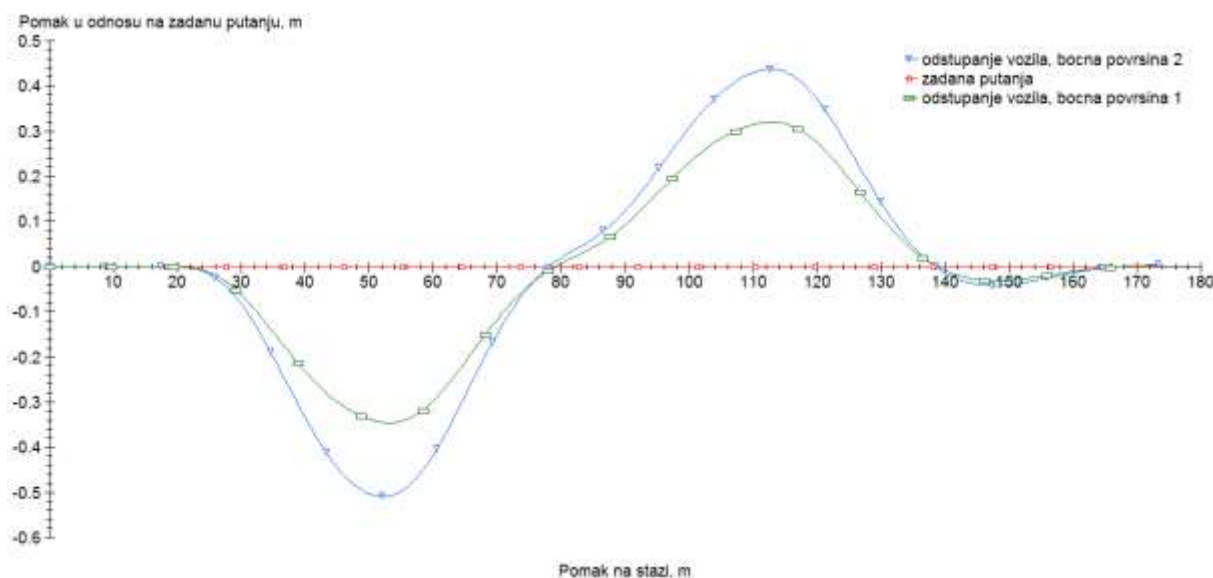


**Slika 57. Zakret oko  $x$  osi - utjecaj širine kotača (*Roll*)**

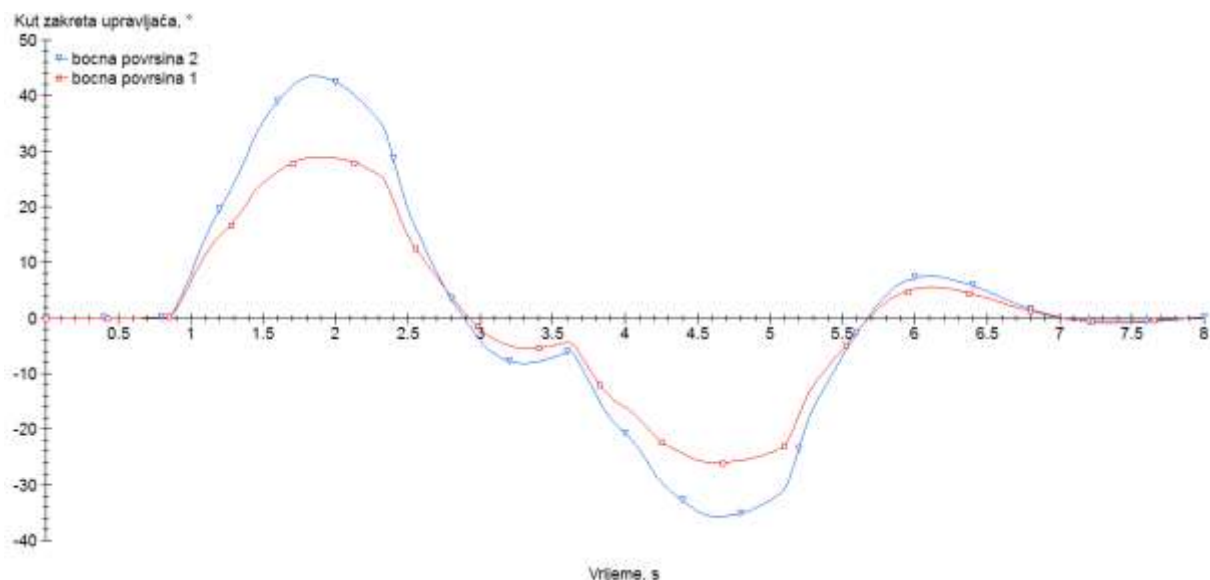
### 5.4.5. Utjecaj bočne površine na ispitnu proceduru s bočnom pobudom vjetra

Sila koja nastaje bočnim udarom vjetra direktno je proporcionalna bočnoj površini prikolice i duljini same prikolice (2.1.2). U programskom paketu CarSim moguće je bočnu površinu prikolice. Bočne površine prikolice razmatrane u ovoj simulaciji su:

- $A_1 = 3 \text{ m}^2$ ,
- $A_2 = 3,5 \text{ m}^2$ .



**Slika 58. Utjecaj bočne površine prikolice na odstupanje vozila od zadane putanje, prilikom udara bočnog vjetra, CarSim**



**Slika 59. Utjecaj bočne površine prikolice na kut zakreta upravljača prilikom bočnog udara vjetra, CarSim**

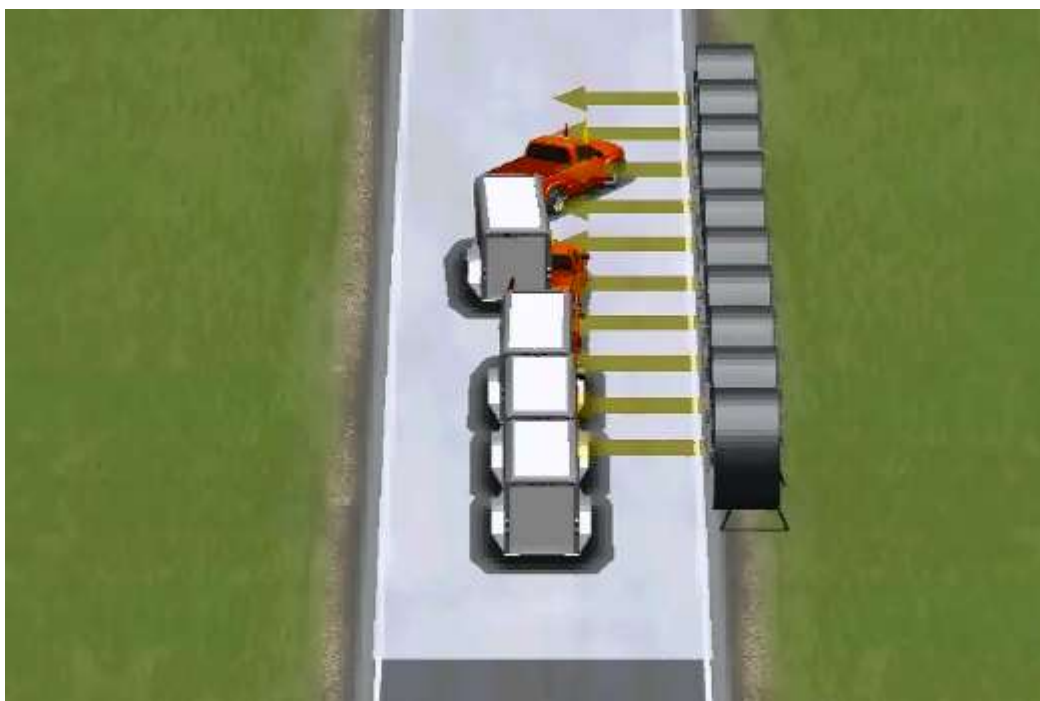
Iz prethodno prikazanih dijagrama vidljiv je utjecaj bočne površine prikolice na stabilnost vozila prilikom bočnog udara vjetra. Bočna površina ima značajan utjecaj u smislu stabilnosti.



Manje od 20 % veća bočna površina prikolice daje značajan utjecaj na stabilnost prikolice. Na stabilnost prikolice u smislu zakreta oko  $x$  osi, velik utjecaj ima visina same prikolice te položaj i masa tereta. Na zakret oko  $z$  osi veliki utjecaj ima položaj tereta, te pravilna konstrukcija prikolice. Osovine prikolice moraju biti ravnomjerno raspoređene tako da moment koji stvara udar vjetra kontriraju kotači u kontaktu s podlogom. Kada se izolira prikolica najbolje je osovine postaviti na sredinu tovarnog prostora te ravnomjerno rasporediti ako je u pitanju prikolica s više osovina.

#### 5.4.6. Utjecaj brzine vožnje na stabilnost vozila s prikolicom

Brzina vožnje pokazala se kao jedan od najutjecajnijih parametara na vozilo koje vuče prikolicu. Već s blagim povećanjem brzine vozilo uvelike gubi stabilnost.

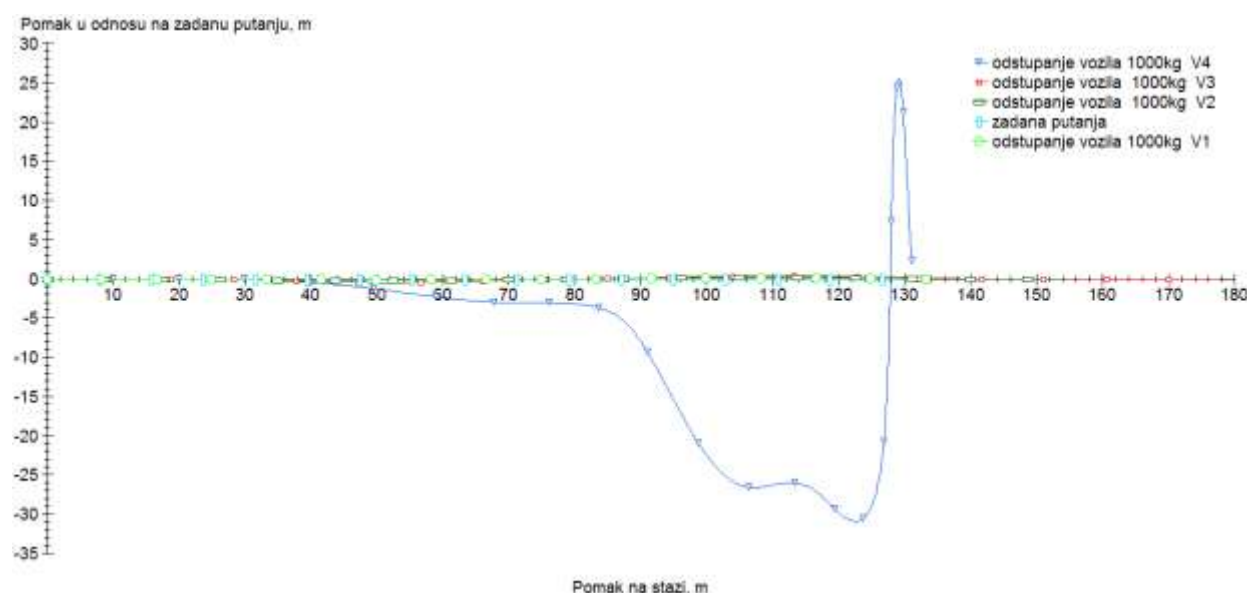


**Slika 60. Vozilo s različitim brzinama vožnje, CarSim**

Prema slici 60. vidljivo je da vozilo s najvećom brzinom gubi stabilnost. U simulaciji su korištena 4 modela vozila kod kojih se razlikovala samo brzina vožnje. Korištena je konfiguracija vozila i prikolice kao i u prethodnoj simulaciji s jedinom razlikom u masi tereta, koja je u ovom slučaju 1000 kg. Brzine vožnje korištene u simulaciji su:

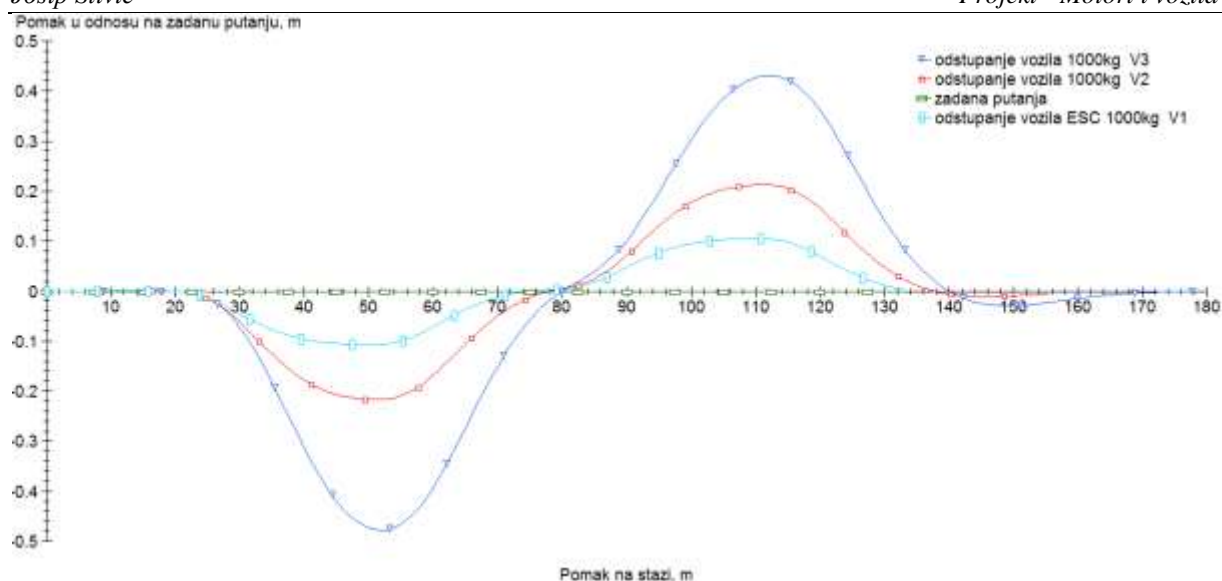
- $v_1 = 60$  km/h,
- $v_2 = 70$  km/h,
- $v_3 = 80$  km/h,
- $v_4 = 90$  km/h.

Na sljedećim dijagramima vidljivo je kako brzina utječe na vozilo koje vuče prikolicu. Prema istom dijagramu vidljivo je da brzine od 60 i 70 km/h nemaju značajno odstupanje od zadane putanje dok se s 80 km/h vidi veće odstupanje. Kod brzine od 90 km/h vozilo gubi stabilnost. Razlog zbog kojeg vozilo ima takvu osjetljivost na brzinu vožnje jest u tome da otpor zraka postaje dominantan, u smislu otpora vožnje, tek pri brzinama većim od 60 km/h. Otpor zraka raste eksponencijalno povećanjem brzine vožnje. Razlog zbog kojeg brzina vožnje utječe na gubitak stabilnosti u slučaju stalne brzine vjetra jest elipsa, odnosno krug trenja (Slika 5.). U krugu trenja vidljivo je da sila koja utječe na izlijetanje vozila jest rezultantna sila koja je vektorski zbroj vučne i bočne sile. U ovom slučaju vučna sila raste eksponencijalno zbog brzine vožnje odnosno svladavanja otpora zraka, što utječe na smanjenje rezerve za bočnu komponentu sile, a to drastično utječe na gubitak stabilnosti vozila prilikom bočnog udara vjetra.

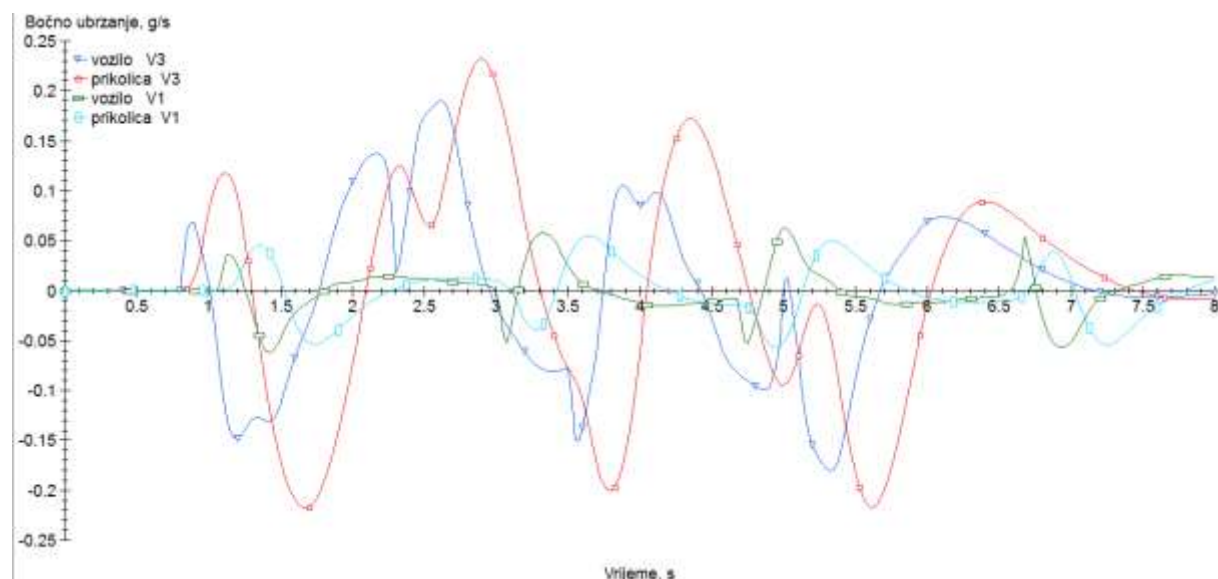


**Slika 61. Bočni pomak vozila od zadane putanje za različite brzine vožnje, CarSim**





Slika 62. Bočni pomak vozila od zadane putanje bez brzine V<sub>4</sub>, CarSim



Slika 63. Utjecaj brzine vožnje na bočno ubrzanje prilikom bočnog udara vjetra za 60 km/h i 80 km/h, CarSim

S prethodne slike vidljiva je razlika bočnog ubrzanja za ne tako veliku razliku u brzini vožnje. Vršne vrijednosti bočnog ubrzanja pri 80 km/h nekoliko puta su veće od vršnih vrijednosti bočnog ubrzanja pri 60 km/h.

Iz ovih rezultata vidljivo je da brzina ima jedan od najvećih utjecaja na stabilnost vozila s prikolicom.

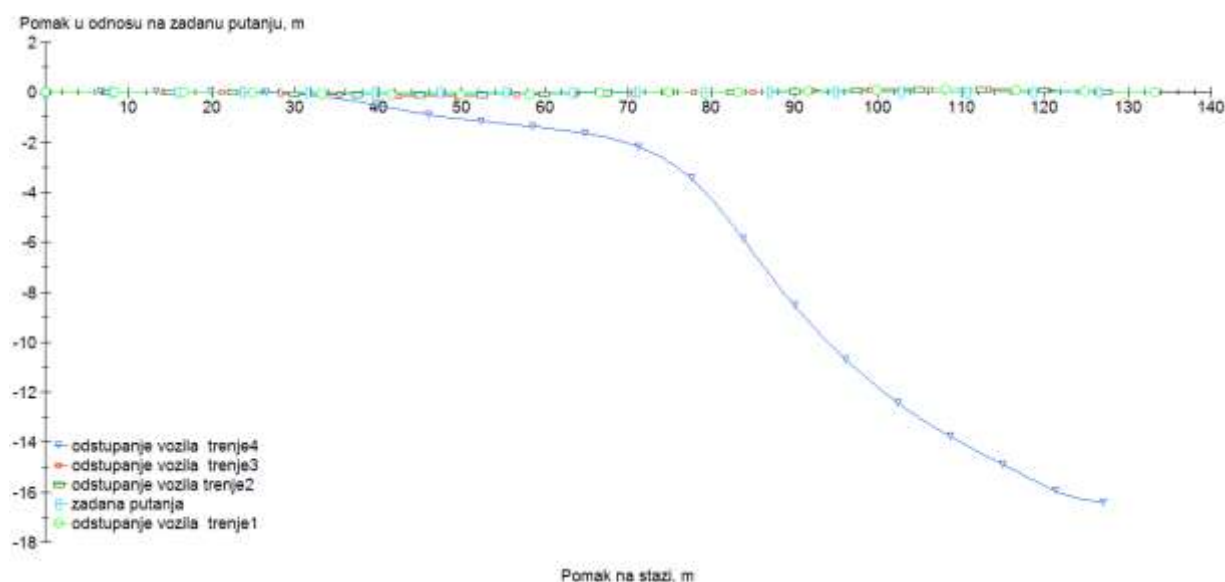
#### 5.4.7. Utjecaj faktora trenja prianjanja

Faktor trenja prianjanja također ima značajan utjecaj na stabilnost vozila prilikom bočne pobude vjetrom. Prema dijagramu na slici 64. vidljiv je utjecaj faktora trenja na gubitak

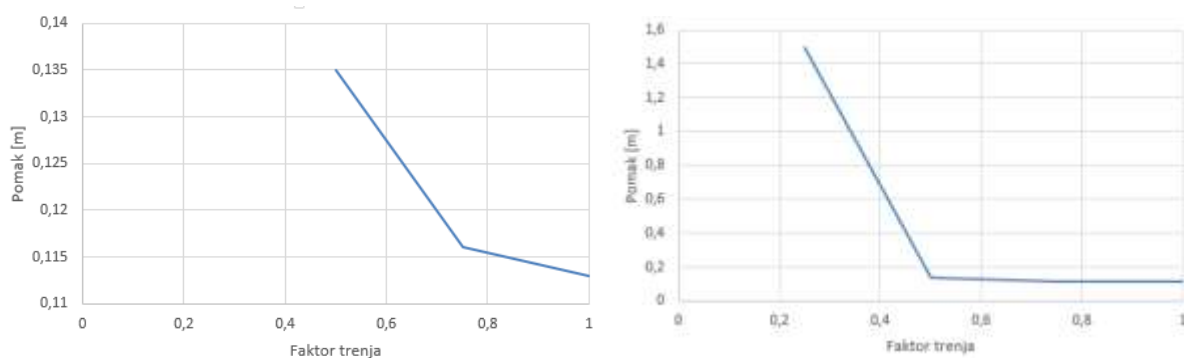
stabilnosti vozila u kontekstu bočnog pomaka od zadane putanje vozila. Vrijednosti trenja korištene u simulaciji:

- $\mu_1 = 1,0$
- $\mu_2 = 0,75$
- $\mu_3 = 0,5$
- $\mu_4 = 0,25$

Iz slika odnosno dijagrama vidljivo je da faktor trenja podloge također nema linearan utjecaj na stabilnost vozila. Razmatrani faktor trenja 0,25 može se razmatrati kao vožnja po ledu, a faktor trenja 1,0 po suhom kolniku. Već je opisano da faktor trenja ima značajan utjecaj na vozilo iz razloga što je reakcija na bočnu pobudu vozila jednaka sili trenja koja je ekvivalentna umnošku težine tereta i faktora trenja.

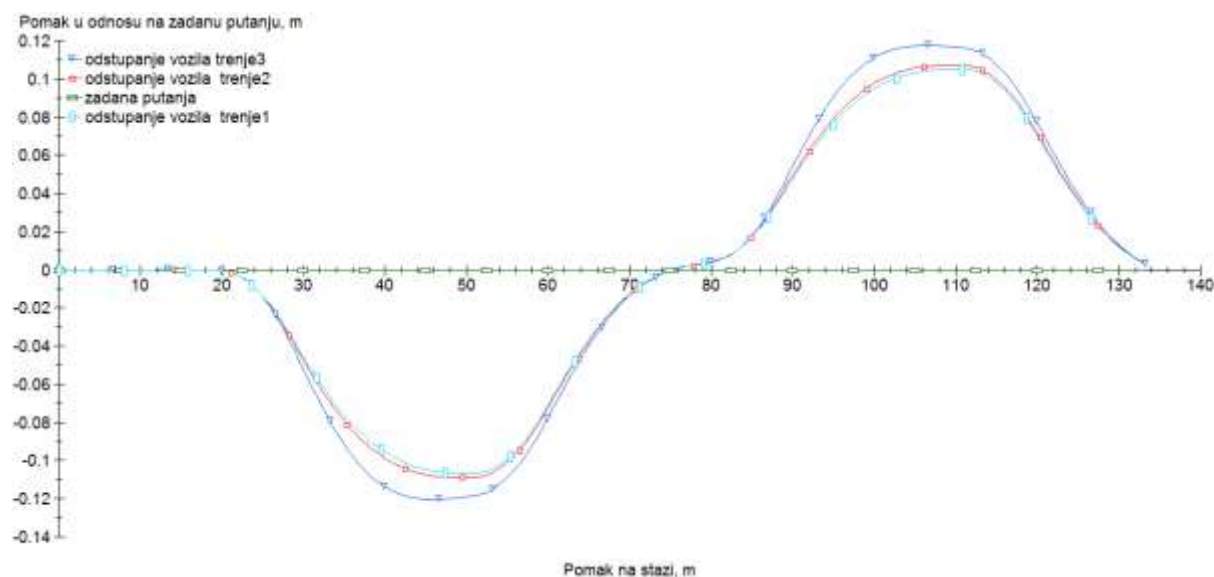


**Slika 64. Utjecaj faktora trenja na bočni pomak vozila od zadane putanje**

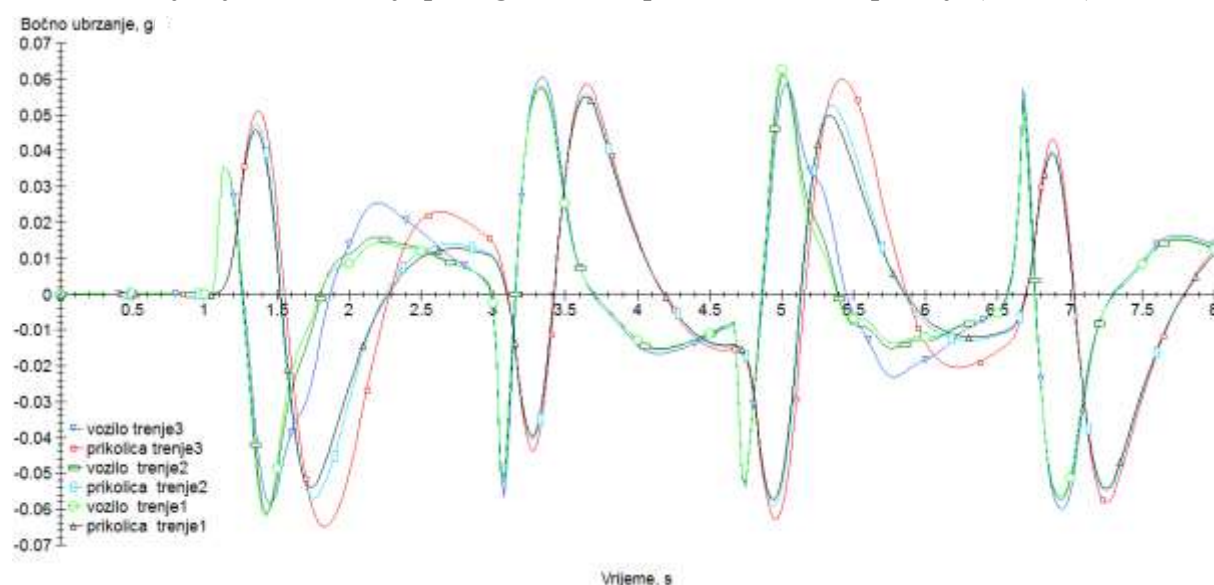


**Slika 65. Odnos faktora trenja i bočnog pomaka usporedba rezultata**

Prema slici 65. vidljiv je odnos bočnog pomaka vozila, uslijed udara bočnog vjetra, u odnosu na faktor trenja. Slika lijevo predstavlja odnos faktora trenja i bočnog pomaka bez faktora trenja leda, za razliku od slike desno na kojoj su svi ispitivani faktori trenja.



**Slika 66. Utjecaj faktora trenja podloge na bočni pomak od zadane putanje (bez leda), CarSim**



**Slika 67. Utjecaj faktora trenja na bočno ubrzanje vozila i prikolice, CarSim**

Iz prethodnog dijagrama vidljivo je da je utjecaj faktora trenja na bočno ubrzanje vozila vrlo malen. Razlog tako maloj razlici je u tom što rezultatna sila ovisi o bočnoj sili koju uzrokuje bočni udar vjetra. U svim provedenim simulacijama bočni udar vjetra jednakog je iznosa, tako da su i sile koje se javljaju između pneumatika i podloge približno jednake.

#### 5.4.8. Utjecaj kuta pod kojim vjetar udara na vozilo

U realnim ispitivanjima, koja provode proizvođači automobila, generatori vjetra postavljaju se pod određenim kutevima na poligon da bi se što realnije pristupilo ispitivanju vozila prilikom bočnog udara vjetra (Slika 42.). U simulaciji se koristi poligon na kojem se mijenja kut pod kojim vjetar udara na vozilo. Korišten je faktor trenja podloge  $\mu_1 = 1,0$ , masa tereta 2000 kg, brzina vožnje 78 km/h, a ostali parametri su također nepromijenjeni. Kut pod kojim vjetar udara na vozilo mijenjan je sljedećim vrijednostima:

- $\alpha_{vj} = 30^\circ$ ,
- $\alpha_{vj} = 45^\circ$ ,
- $\alpha_{vj} = 90^\circ$ .

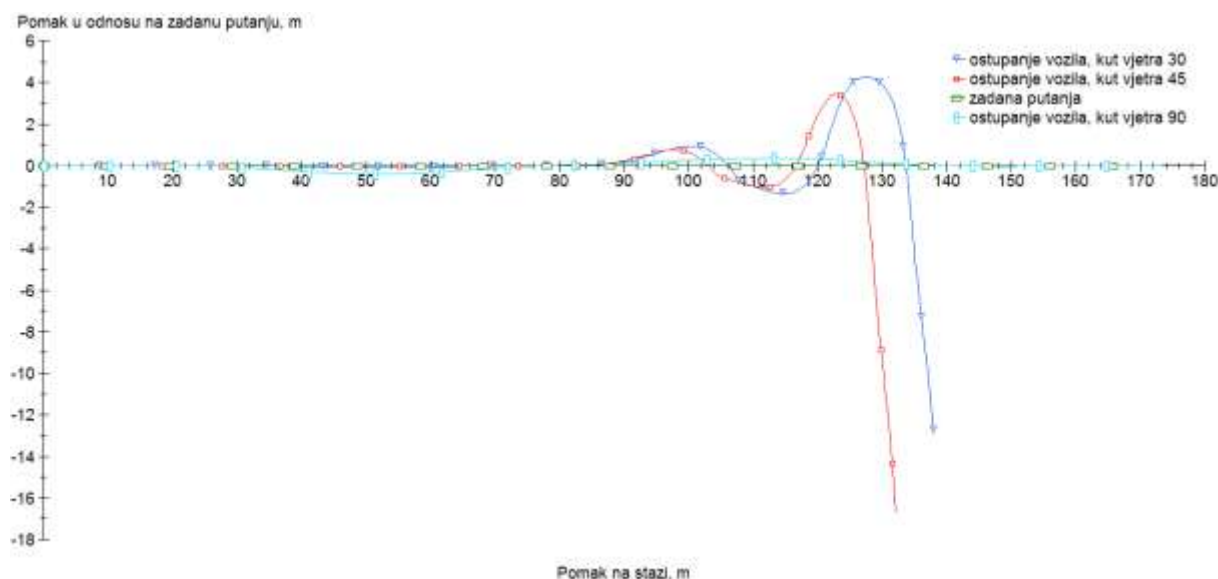


**Slika 68. Poligon s generatorima vjetra pod kutem 45°, CarSim**

Kut se mjeri u odnosu na zadanu putanju ispitne staze, što znači da je kut 90° okomit na vožnju vozila s prikolicom.

Prema dijagramima u simulacijama vidljivo je da najmanji utjecaj ima vjetar okomit na vozilo. Razlog takvom ponašanju vozila jest zbog postavljenih generatora vjetra, koji ravnomjerno djeluju na vozilo kod kuta od 90°, jer nasuprotni generatori vjetra generiraju vjetar suprotnog smjera jedan u odnosu na drugi. Kod slučaja kuteva od 30° i 45° vjetar, u prvom dijelu poligona, dijelom pomaže vozilu i puše u smjeru vožnje vozila, a manja komponenta vjetra nastoji vozilo gurnuti s putanje. U drugom dijelu poligona, vjetar puše dijelom kao protuvjetar a dijelom

nastoji vozilo pomaknuti s putanje. Zbog već objašnjene elipse trenja takvo vozilo puno prije dođe u situaciju da ostane bez rezerve bočne komponente sile te potom dolazi do gubitka stabilnosti.



**Slika 69. Utjecaj kuta pod kojim vjetar udara na vozilo, CarSim**

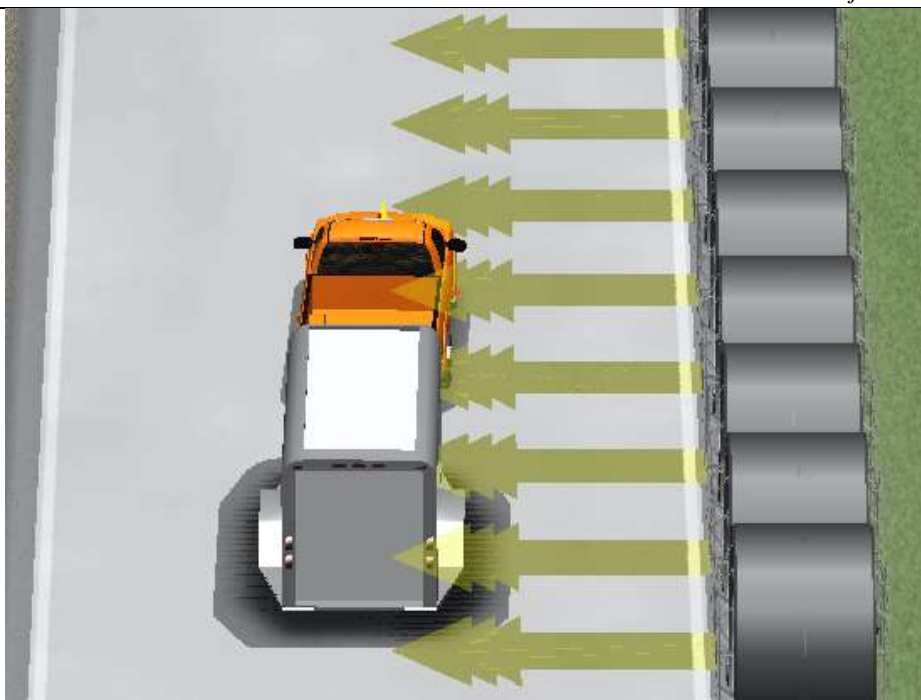
Prema dijagramima vidljivo je da bočni udar vjetra nema velik utjecaj pri kutevima  $30^\circ$  i  $45^\circ$ , a to se događa iz prethodno navedenih razloga. Svi ostali parametri korišteni u simulaciji jednaki su u sva tri slučaja, a vozila s kutevima različitim od  $90^\circ$  izgubili su stabilnost u potpunosti.

#### 5.4.9. Utjecaj brzine vjetra

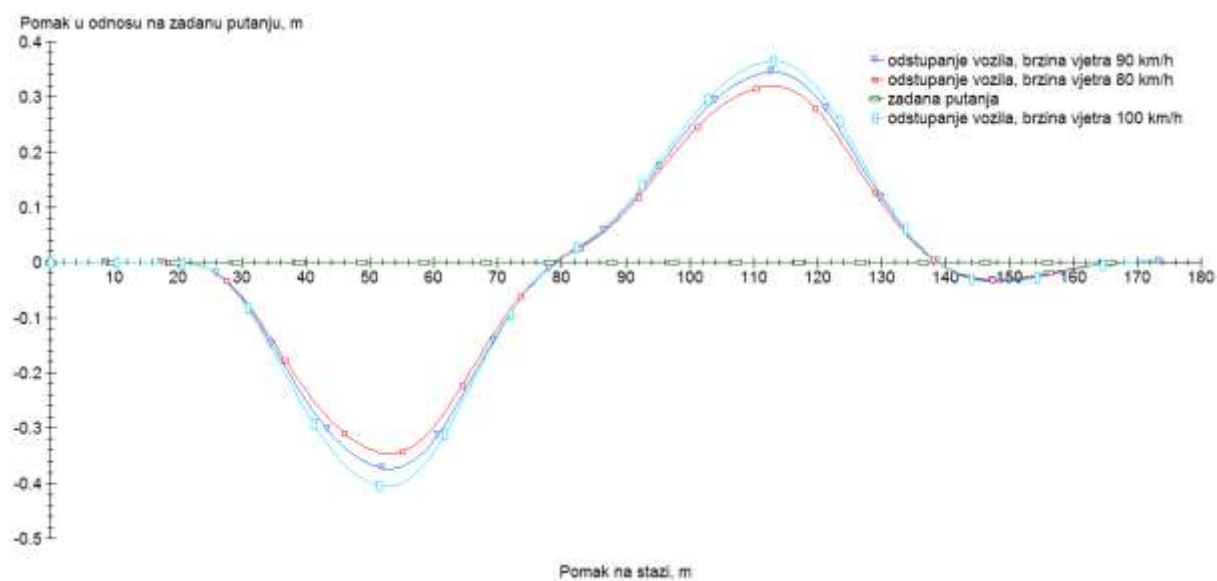
U ovom poglavlju razmatran je utjecaj brzine vjetra. Prema slici 70. duljinom strelica prikazane su različite brzine vjetra, koje imaju direktan utjecaj na jačinu bočne pobude na vozilo. Razmatrane brzine vjetra su:

- $v_{1vj} = 80 \text{ km/h}$ ,
- $v_{2vj} = 90 \text{ km/h}$ ,
- $v_{3vj} = 100 \text{ km/h}$ .

Najveća brzina vjetra pokazala se najutjecajnijom na bočnu stabilnost. U ovoj simulaciji mijenjan je jedino parametar brzine udara vjetra. Ostali parametri jednaki su kao i u prethodnoj simulaciji s brzinom vožnje od  $78 \text{ km/h}$ . Brzina udara vjetra zbog bočne sile koju ostvaruje na vozilo ima značajan utjecaj na stabilnost. Prema dijagramima prikazan je utjecaj brzine vjetra na pomak od zadane putanje, zakret oko  $z$  osi te na kut upravljača.

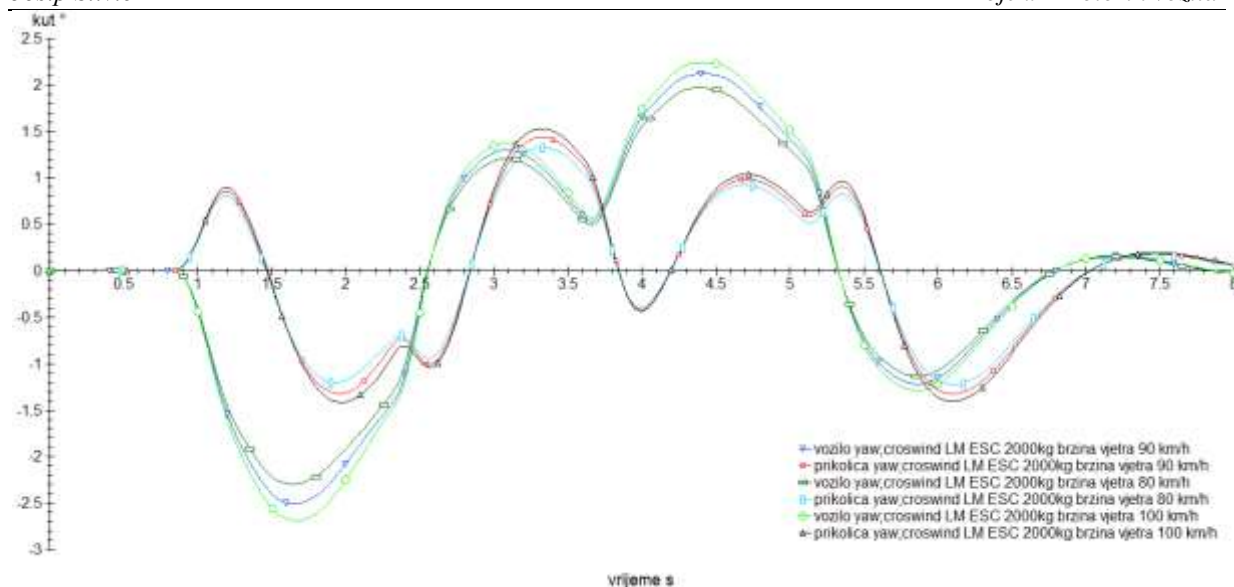


Slika 70. Različite brzine vjetra prilikom udara na vozilo



Slika 71. Pomak od zadane putanje - utjecaj brzine vjetra





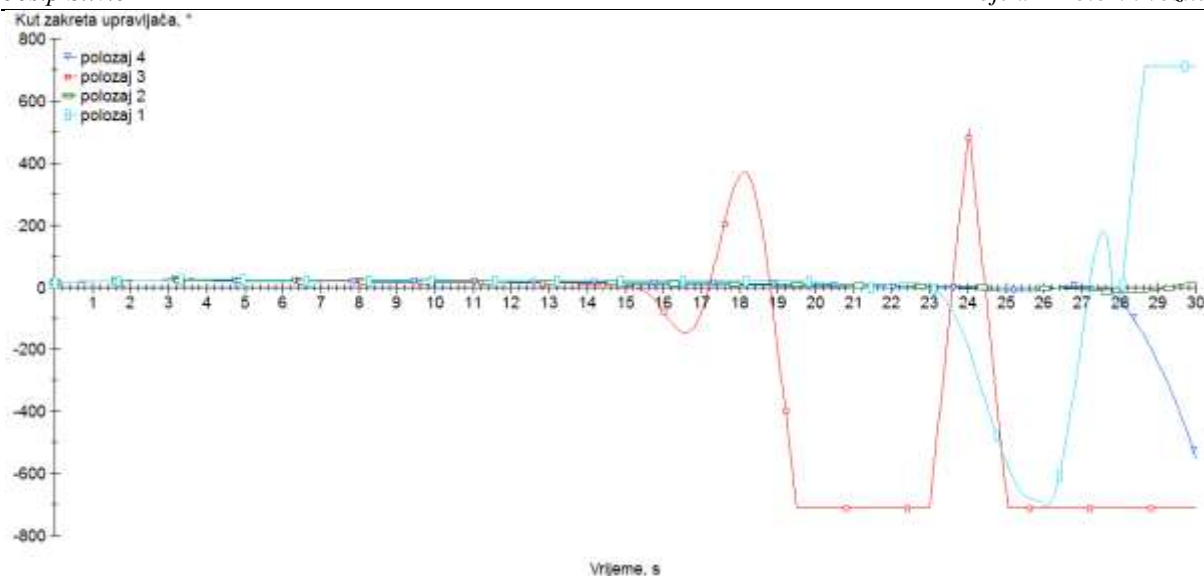
**Slika 72. Zakret oko vertikalne osi u ravni xy za različite brzine vjetra**

Prema prethodnom dijagramu vidljivo je da se vozilo i prikolica ne zakreću uvijek u suprotnu stranu, nego da periodično imaju isti smjer zakreta. Također je iz dijagrama vidljivo da je i kut zakreta veći kod situacije s većom brzinom vjetra.

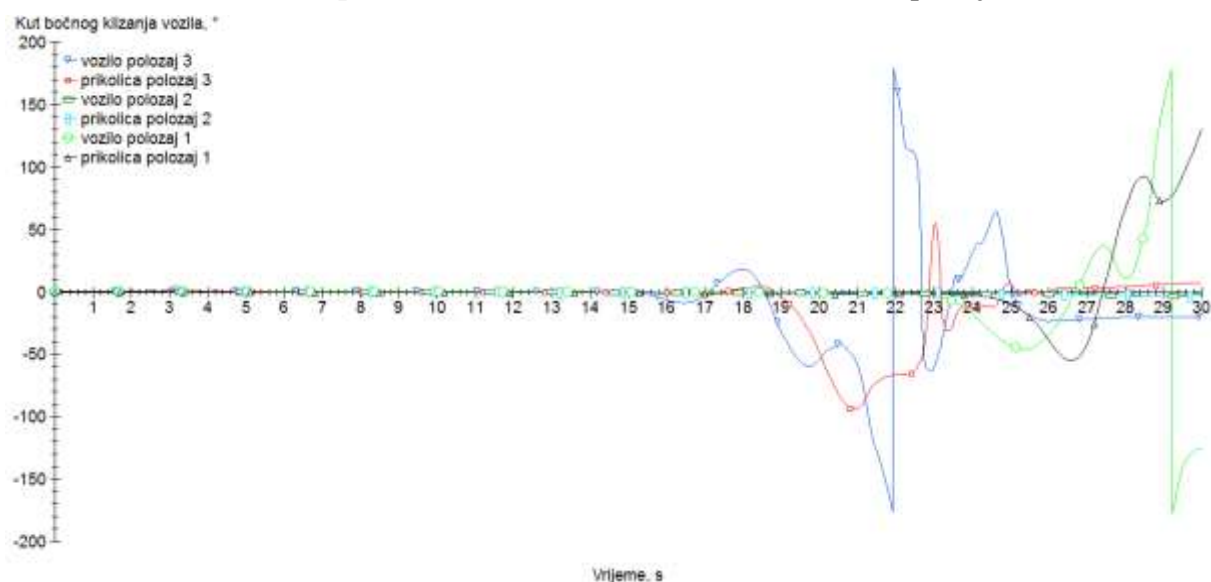
#### **5.4.10. Utjecaj položaja tereta na poligonu za ispitivanje podupravljalivosti vozila**

U ovom ispitivanju položaj tereta mijenjan je kao i u poglavlju 5.4.2 te je razmatran njegov utjecaj na poligonu za ispitivanje podupravljalivosti vozila. Položaji tereta razmatrani u ovoj simulaciji su:

- $x_1 = 4850$  mm,
- $x_2 = 2000$  mm,
- $x_3 = 5000$  mm,
- $x_4 = 1500$  mm.



**Slika 73 . Utjecaj rasporeda tereta u smjeru osi  $x$ , na kut zakreta upravljača, CarSim**



**Slika 74. Utjecaj položaja tereta na kut bočnog klizanja vozila i prikolice, CarSim**

Prema rezultatima vidljiv je utjecaj položaja tereta u smjeru osi  $x$ . U slučaju gdje je teret bliže vučnoj kuki vozila ispitivanje se pokazalo boljim nego u slučaju tereta postavljenog preblizu stražnjem kraju prikolice. Teret postavljen bliže stražnjem kraju prikolice uzrokuje veliku nestabilnost prikolice s malim pomakom prema stražnjem kraju. Iako je poligon za ispitivanje podupravljivosti, vozilo s prikolicom u svim rezultatima ponaša se preupravljivo i nestabilno gubi kontrolu.



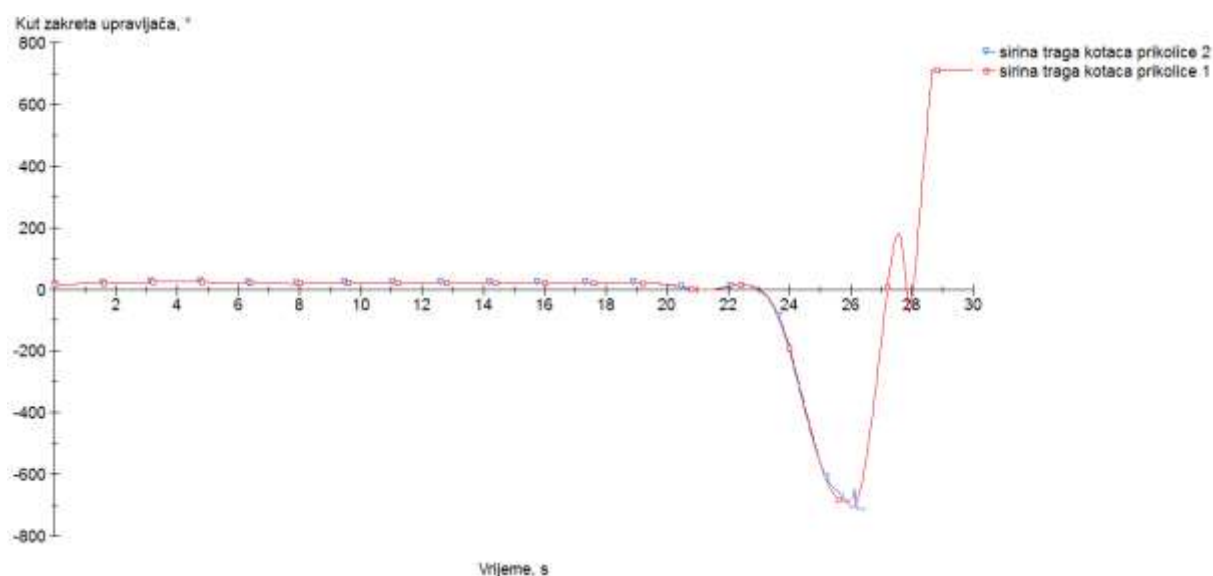
### 5.4.11. Utjecaj širine traga kotača na poligonu za ispitivanje podupravljanosti vozila

Utjecaj širine traga kotača nema velik utjecaj na podupravljanje što je vidljivo na slici ispod teksta. Na prikolici je mijenjan samo trag kotača, dok su ostali parametri ostali nepromijenjeni.

Širine traga kotača su:

- $b_{k1} = 2170 \text{ mm}$ ,
- $b_{k2} = 1500 \text{ mm}$ .

Utjecaj širine traga kotača nije primjetan jer vozilo izgubi stabilnost puno prije nego bi takav parametar mogao postati utjecajan. To je vidljivo kada se uspoređi dijagram ispod s dijagramima u drugim ispitnim procedurama, u kojima trag kotača pokazuje značajniji utjecaj na stabilnost.

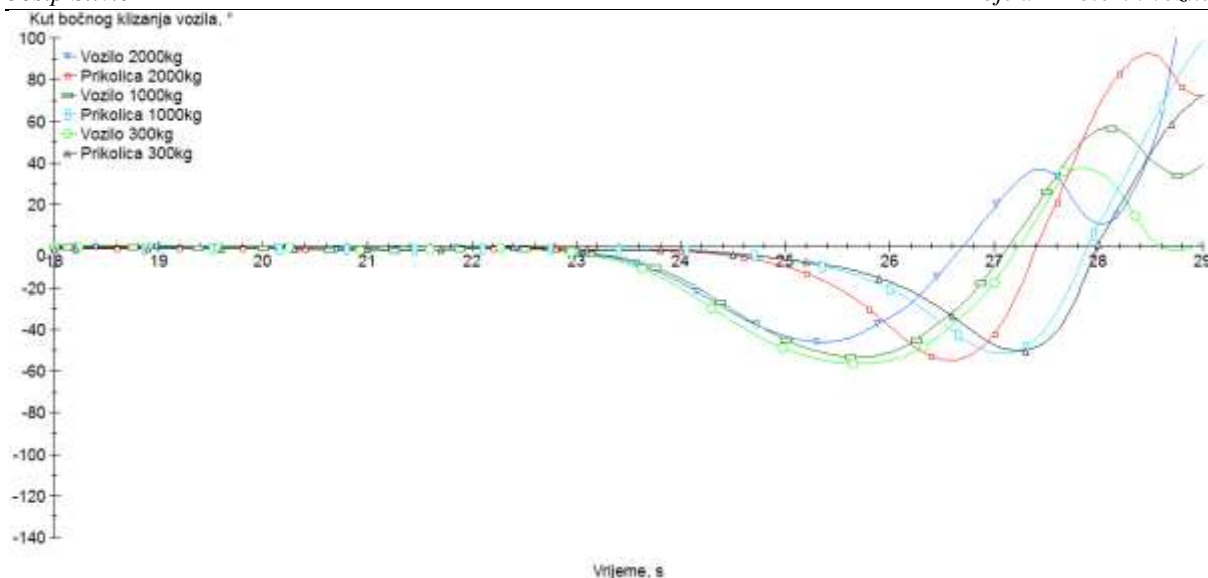


Slika 75. Zakret upravljača - utjecaj širine kotača na podupravljanje

### 5.4.12. Utjecaj mase tereta na poligonu za ispitivanje podupravljanosti vozila

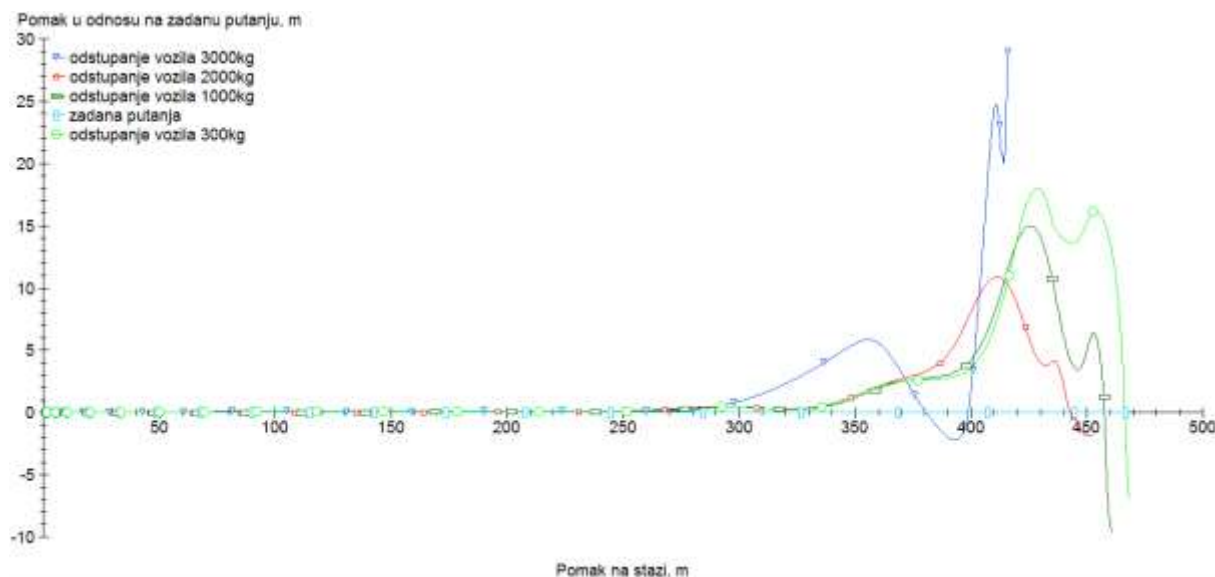
U ovom ispitivanju korištene su 4 konfiguracije prikolice sa različitim masama tereta:

- $m_1 = 3000 \text{ kg}$ ,
- $m_2 = 2000 \text{ kg}$ ,
- $m_3 = 1000 \text{ kg}$ ,
- $m_4 = 300 \text{ kg}$ .



**Slika 76. Utjecaj mase tereta na kut bočnog klizanja vozila, izuze mase 3000kg, CarSim**

Masa tereta postavljena je na prikolicu jednako kao i u proceduri s bočnom pobudom vjetra. Teret je postavljen između stražnjih osovina, ali bliže kuki vozila. Faktor trenja je  $\mu = 1$ . Na poligonu za ispitivanje utjecaj mase tereta je negativan. Za razliku od ispitivanja vozila s prikolicom u proceduri s bočnom pobudom vjetra, gdje je masa tereta imala pozitivan utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom, u ovoj proceduri masa tereta ima negativan utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom.

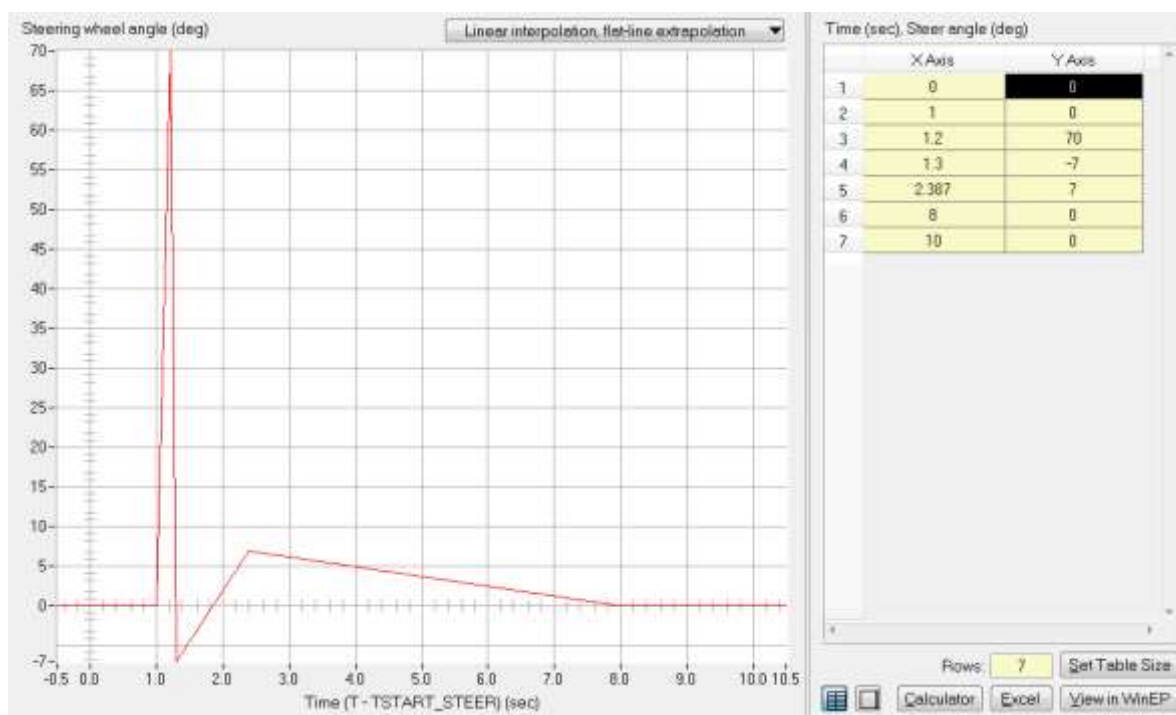


**Slika 77. Utjecaj mase tereta na pomak u odnosu na zadanu putanju vozila, CarSim**

Prema slikama vidljivo je da utjecaj mase tereta na podupravljanje i nije toliko velik u slučaju kada je teret pravilno raspoređen na prikolici

### 5.4.13. Utjecaj mase tereta u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu

Jedna od važnijih normi za ispitivanje vozila s prikolicom bavi se upravo ovakvim ispitivanjem vozila i prikolice. Prilikom simuliranja procedure s impulsnom pobudom upravljača korišten je poligon iz ispitne procedure s prevrtanjem vozila oko  $x$  osi, te je pokret upravljača zamijenjen pokretom koji odgovara normi ISO 9815:2003. Da bi se ostvarila odgovarajuća pobuda na vozilo, pri svakoj brzini vožnje odnosno pri mijenjanju određenih parametara prikolice, potrebno je zadavati odgovarajući impuls zakreta upravljača. Ovaj pokret zadaje se iterativnom metodom, tako da se dobije valjano osciliranje vozila i prikolice (Slika 78).

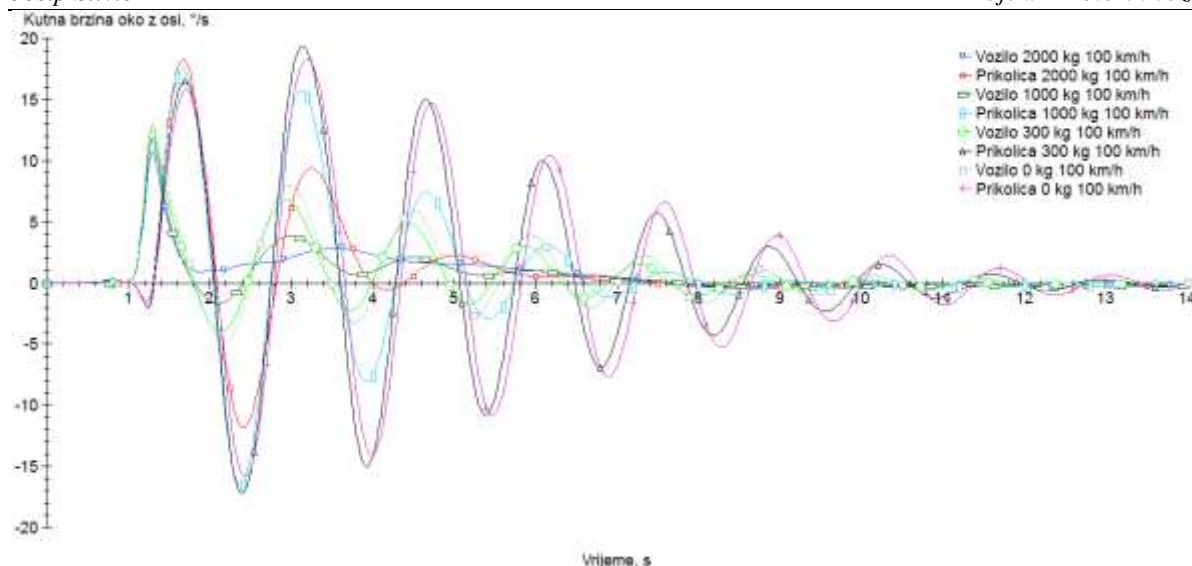


**Slika 78. Zadavanje impulsa upravljača vučnog vozila, CarSim**

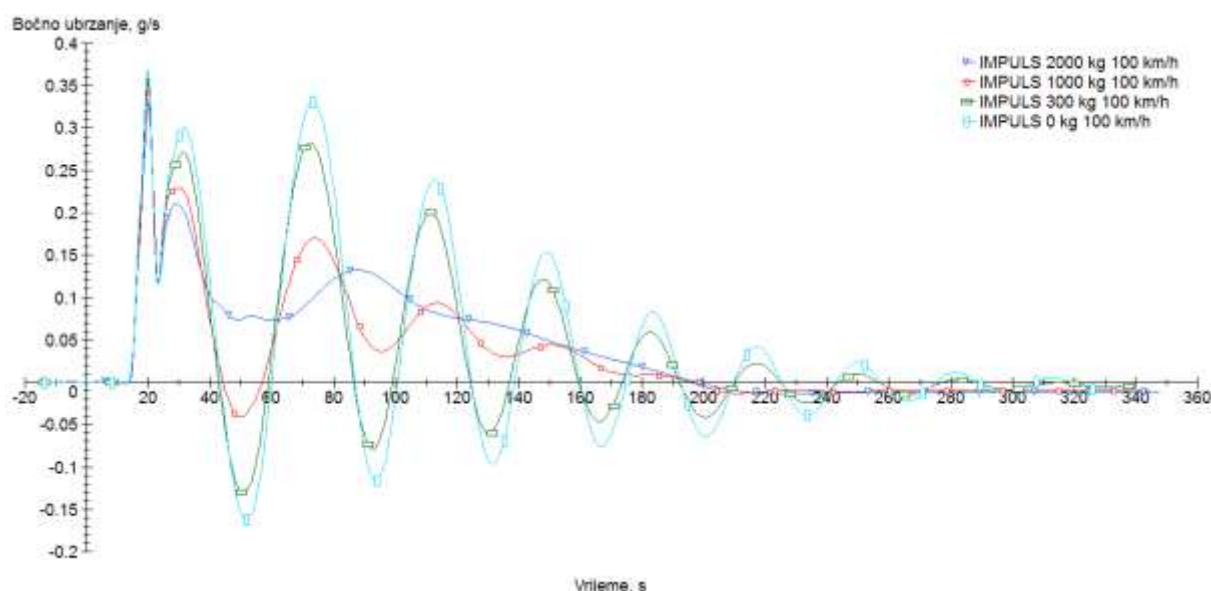
U ovoj simulaciji razmatran je utjecaj mase tereta na stabilnost vozila i prikolice. Mase tereta razmatrane u simulaciji su:

- $m_1 = 0$  kg, (prazna prikolica)
- $m_2 = 300$  kg,
- $m_3 = 1000$  kg,
- $m_4 = 2000$  kg.

Utjecaj mase tereta na stabilnost vozila s prikolicom prikazan je sljedećim dijagramima.



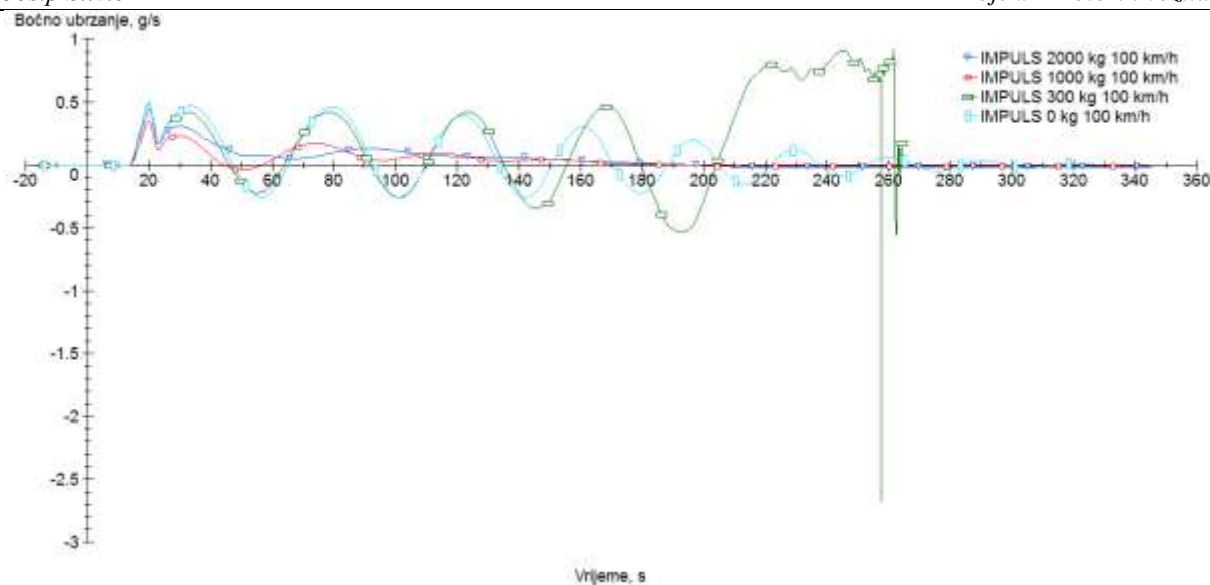
**Slika 79. Kutna brzina oko z osi za različit iznos mase tereta na prikolici, CarSim**



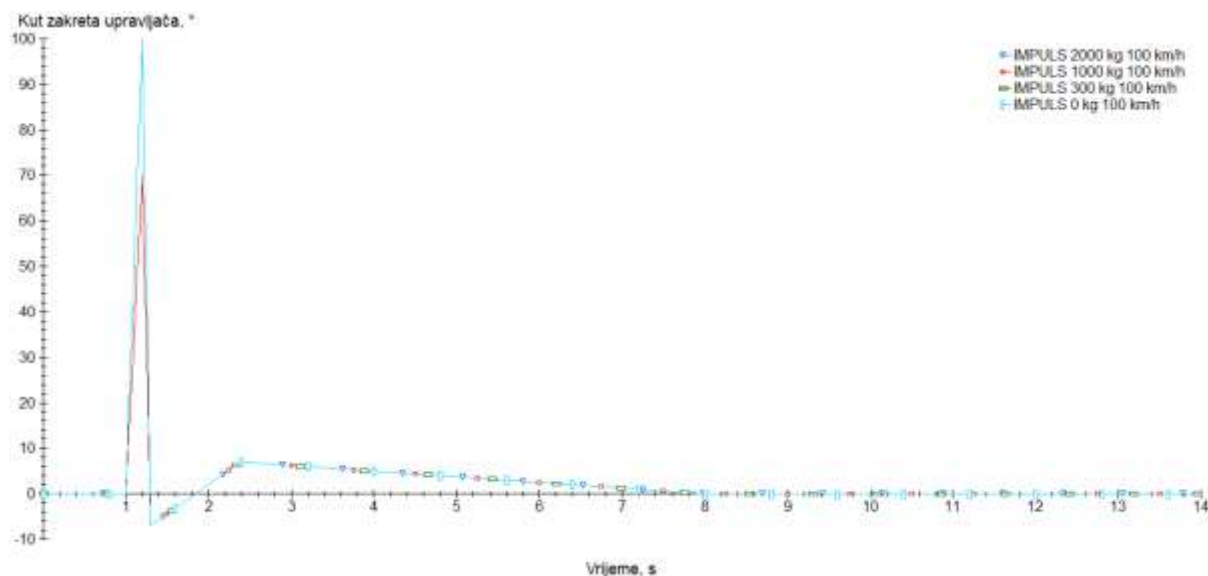
**Slika 80. Bočno ubrzanje za različite iznose mase tereta, CarSim**

Na prethodnim dijagramima vidljivo je stabilno stanje vozila, pobuđenog impulsnim zakretom volana. Iz dijagrama se vidi da masa tereta ima pozitivan utjecaj na vozilo s prikolicom glede stabilnosti, u slučaju kada je teret pravilno postavljen. U ovom slučaju teret je na prikolici postavljen između kuke vučnog vozila i osovine prikolice, a brzina vožnje je 100 km/h.

Na sljedećem dijagramu prikazan je slučaj kada se zada veći impuls zakreta volana za iste parametre vozila i prikolice.



Slika 81. Bočno ubrzanje za različite mase tereta, CarSim



Slika 82. Zadani kut upravljača vučnog vozila, CarSim

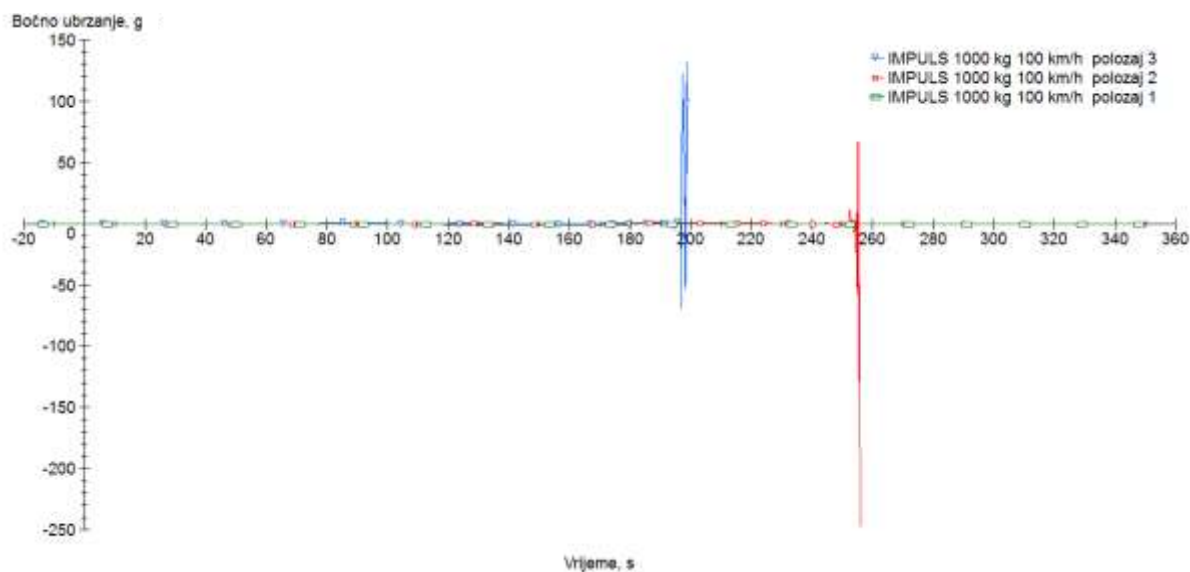
Iz dijagrama je vidljiv utjecaj većeg zadanog zakreta upravljača. Za prikolicu bez tereta bočno ubrzanje postepeno raste te dovodi vozilo i prikolicu do potpunog gubitka stabilnosti. Razlika u zakretu upravljača jest  $30^\circ$  u odnosu na prethodnu simulaciju.

#### 5.4.14. Utjecaj položaja tereta u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu

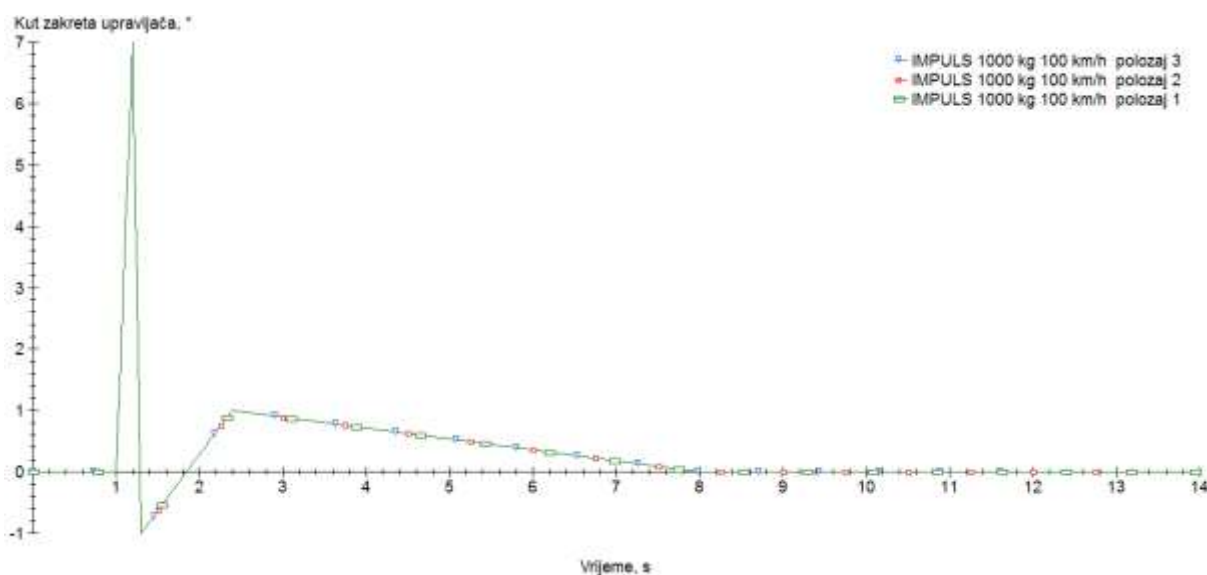
U ovoj simulaciji korišten je model vozila s teretom od 1000 kg, te je mijenjan samo parametar pozicije tereta na vozilu. Ostali parametri jednaki su kao u prethodnoj simulaciji. Udaljenost osovine prikolice od kuke vučnog vozila je 2600 mm. Položaj tereta zadan je također udaljenošću od kuke vučnog vozila. Položaji tereta na prikolici su:

- $x_{tl} = 2000$  mm,

- $x_{t2} = 2600 \text{ mm}$ ,
- $x_{t3} = 2800 \text{ mm}$ .



**Slika 83. Utjecaj položaja tereta na prikolici na ispitnu proceduru s impulsnim zakretom upravljača, CarSim**



**Slika 84. Kut zakreta zadan za različite položaje tereta, CarSim**

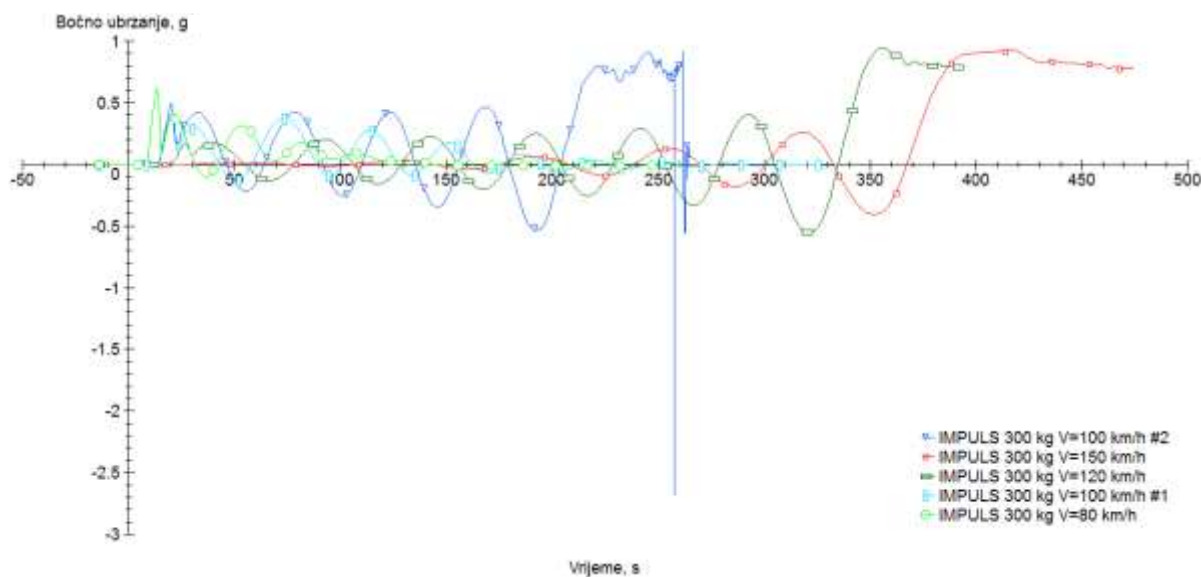
Prema prethodnim dijagramima vidljivo je da za jako mali zakret upravljača, vozilo s masom postavljenom na stražnjoj osovini i iza nje gubi stabilnost. Prema dva ispitivanja pokazano je da položaj tereta ima značajan utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom.

#### **5.4.15. Utjecaj brzine vožnje u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu**

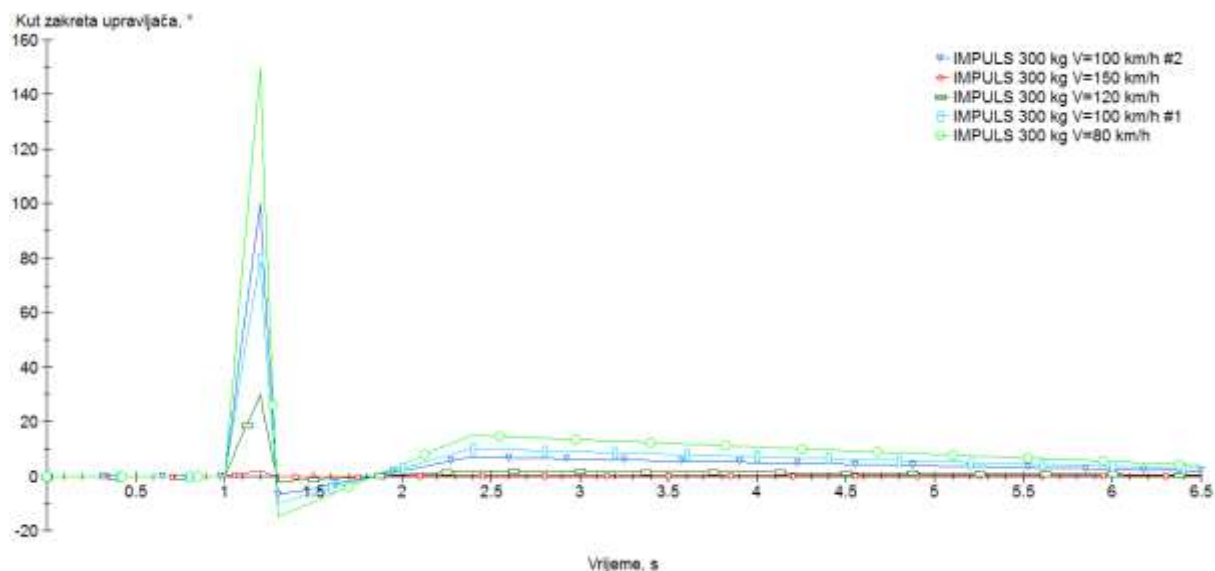
Za brzinu vožnje već je pokazano kakav ima utjecaj u ispitnoj proceduri s bočnom pobudom vjetra. Brzine vožnje korištene u simulaciji su:

- $v_{1i} = 80 \text{ km/h}$ ,
- $v_{2i} = 100 \text{ km/h}$ ,
- $v_{3i} = 120 \text{ km/h}$ ,
- $v_{4i} = 150 \text{ km/h}$ .

Uz brzinu vožnje također je mijenjan impuls zakreta upravljača, da bi se dobio valjan odaziv vozila, slično kao u normi. Masa tereta je 1000 kg, a položaj tereta 2000 mm udaljen od kuke vučnog vozila. Ostali parametri jednaki su kao i u prethodnim simulacijama.



**Slika 85. Bočno ubrzanje za različite brzine vožnje, CarSim**



**Slika 86. Kut zakreta upravljača za različite brzine vožnje, CarSim**

Prema prethodnim dijagramima vidljivo je da je vozilo s brzinom vožnje 80 km/h uz maksimalan kut zakreta upravljača 150° stabiliziralo vožnju i prigušilo relativno gibanje



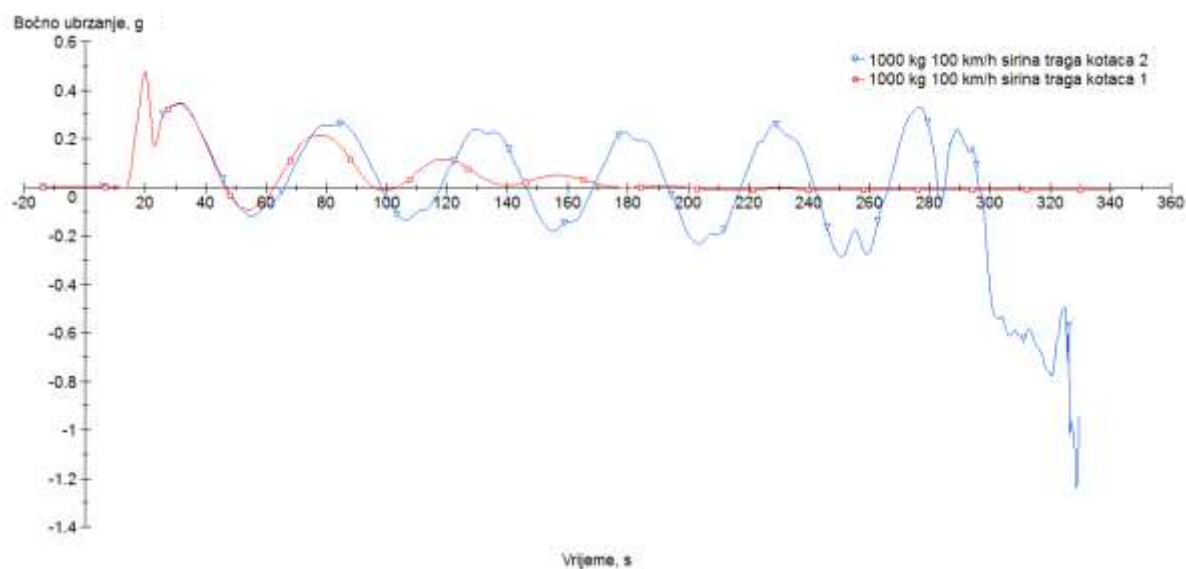
između vučnog vozila i prikolice. Za brzinu 100 km/h ispitana su dva slučaja. U slučaju sa zakretom upravljača  $80^\circ$  vozilo s prikolicom uspješno je prigušilo titranje, dok je u slučaju sa zakretom upravljača  $100^\circ$  vozilo s prikolicom izgubilo stabilnost. Pri brzini od 120 km/h relativno mali kut zakreta upravljača od  $30^\circ$  rezultirao je gubljenjem stabilnosti vozila i prikolice. Pri brzini od 150 km/h skoro pa zanemarivi kut zakreta upravljača od  $2^\circ$  rezultirao je gubljenjem stabilnosti vozila i prikolice.

Iz prethodnih rezultata može se zaključiti da vozilo s prikolicom ne bi trebalo prelaziti brzinu od 100 km/h, te da se i pri toj brzini treba oprezno držati upravljač da ne bi došlo do gubitka stabilnosti čak i u dobrim uvjetima na cesti bez bočnog vjetra.

#### 5.4.16. Utjecaj širine traga kotača u proceduri s impulsnom pobudom upravljača na vučnom vozilu

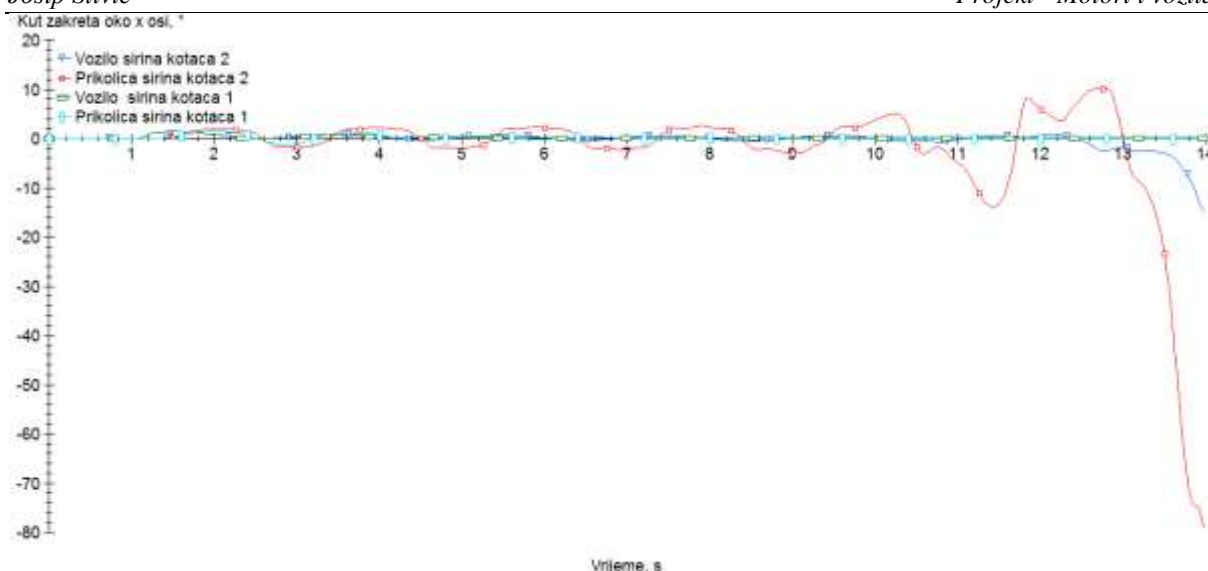
U ovoj proceduri mijenjana je samo širina traga kotača, a ostali parametri zadržani su iz prethodnih simulacija, uz masu tereta 10000 kg. Dvije širine traga kotača korištene su u simulaciji:

- $b_{1i} = 1810$  mm,
- $b_{2i} = 1500$  mm.



Slika 87. Utjecaj širine traga kotača na stabilnost u ispitnoj proceduri s impulsnom pobudom upravljača vozila, CarSim





**Slika 88. Utjecaj širine traga kotača na kut zakreta oko  $x$  osi, CarSim**

Prema prethodnim dijagramima vidljiv je utjecaj širine traga kotača na stabilnost vozila s prikolicom. Prikolica s kraćim rasponom kotača izgubila je stabilnost prilikom ispitivanja, dok se vozilo sa širim rasponom kotača stabiliziralo nakon impulsnog zakreta upravljača. Zakret oko  $x$  osi veći je kod manjeg raspona kotača te se može uzeti kao značajan faktor zbog gubljenja stabilnosti.

### 5.5. Usporedba rezultata

U ovom poglavlju prikazani su rezultati u kontekstu pozitivnog ili negativnog utjecaja na stabilnost. Najutjecajniji parametri su brzina vožnje, trenje podloge i položaj tereta u smjeru  $x$  osi. Sljedećom tablicom prikazan je utjecaj parametara na stabilnost vozila.

**Tablica 3 . Usporedba rezultata**

	Utjecaj parametra	Stabilnost
Raspored tereta, u smjeru osi $x$	Teret postavljen bliže vučnom vozilu	RASTE
Raspored tereta, u smjeru osi $y$	Teret postavljen bliže sredini tovarnog prostora	RASTE
Masa tereta, bočna pobuda vjetra	RASTE	RASTE
Masa tereta, poligon za ispitivanje podupravljanja	RASTE	OPADA
Masa tereta, impuls zakreta upravljača	RASTE	RASTE

Brzina vožnje	RASTE	OPADA
Brzina vjetra	RASTE	OPADA
Kut pod kojim vjetar udara na vozilo	RASTE	RASTE
Faktor trenja podloge	RASTE	RASTE
Širina traga kotača	RASTE	RASTE
Bočna površina prikolice	RASTE	OPADA

Prema tablici 3. prikazani su rezultati sa svojim utjecajima na stabilnost. Potrebno je naglasiti da parametri kao što su brzina vožnje, brzina vjetra, faktor trenja podloge, širina traga kotača uvijek imaju ovakav utjecaj na stabilnost. Utjecaj mase tereta može imati pozitivan i negativan utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom, a to ovisi o uvjetima u kojima se vozilo nalazi te o rasporedu tereta na samoj prikolici. Pravilno raspoređen teret doprinosi stabilnosti vozila, a nepravilno raspoređen teret stvara znatnu opasnost od gubitka stabilnostima u zahtjevnim uvjetima u prometu. Brzina vožnje je najutjecajniji parametar iz razloga što otpori vožnje porastom brzine rastu eksponencionalno te je za male poraste brzine velika razlika u djelovanju sila na vozilo. Zadnja ispitna procedura s impulsnom pobudom najviše pokazuje koliko je važno odgovorno i pravilno postupati s teretom, brzinom vožnje i ostalim parametrima kod vožnje prikolice.

Kod pravilnog postavljanja tereta važno je paziti da teret u smjeru osi  $y$  bude što bliže težištu vozila, a u smjeru osi  $x$  važno je da se teret smjesti između težišta stražnjih osovine i vučne kuke, blako pomaknuto od težišta osovine, tako da teret ipak većinski nosi prikolica a ne vučno vozilo, a to je važno da se izbjegne preopterećenje kuke i samog vučnog vozila. Iznimno važno je prilagoditi brzinu vožnje uvjetima na cesti, a također je korisno imati neki od sustava objašnjenih u poglavlju (3.4). Kao nastavak ovog istraživanja mogli bi se neki od sustava objašnjenih u poglavlju (3.4) modelirati u simulaciji te analizirati njihov utjecaj na stabilnost vozila s prikolicom.

## **6. ZAKLJUČAK**

U ovom radu izvedena je simulacija vozila s prikolicom prilikom udara bočnog vjetro, simulacija na poligonu za ispitivanje podupravljalivosti i simulacija s impulsnom pobudom upravljača vozila. Prikazan je utjecaj bočne pobude pri promjeni različitih parametara prikolice te samih okolnih uvjeta. Prikazan je utjecaj mase tereta na prikolici, utjecaj položaja mase na prikolici, utjecaj brzine vožnje, trenja podloge, brzine udara vjetro, kuta pod kojim vjetar udara na vozilo. Najutjecajnim parametrom pokazala se brzina vožnje. Zbog elipse trenja vozila brzina vožnje eksponencijalno utječe na stabilnost vozila te samo mala promjena brzine vožnje drastično utječe na gubitak stabilnosti prilikom bočne pobude vozila i prikolice. U ovoj ispitnoj proceduri razmatran je utjecaj položaja mase te je doveo do zaključka da masa bliže vozilu ima pozitivan utjecaj na stabilnost prilikom bočne pobude. Ovu činjenicu treba razmatrati u realnim uvjetima gdje se javlja problem ako se previše optereti stražnja strana vučnog vozila. Problem može nastati s preopterećenjem vučne kuke na kojoj proizvođač zadaje dopušteno opterećenje, s preopterećenjem stražnje osovine vozila te stražnjeg ovjesa. Također je problem ako se velika masa stavi blizu stražnjeg kraja vučnog vozila tada se prednji kraj vučnog vozila rastereti. U slučaju rasterećenja prednjeg kraja vozila, vozilo će se puno prije naći u podupravljalivoj situaciji te se mogućnost upravljanja takvog vozila smanjuje. U radu se nastojalo objasniti koji su i fizikalni utjecaji samog vozila i prikolice te razlozi zašto se vozilo baš tako ponaša u različitim uvjetima. Stvarni uvjeti na cesti nisu isti kao u simulacijama, ali se iz ovakvih ispitivanja odnosno istraživanja može zaključiti da je pravilno postavljanje tereta na vozilu iznimno važno, te da je važno prilagoditi brzinu vožnje u slučaju vuče prikolice za vozilom, također je potrebno prilagoditi način vožnje uvjetima na cesti uslijed vremenskih neprilika.

**LITERATURA**

- [1] Hucho, Sovran.: AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1993.
- [2] Z. Lulić ,G. Šagi,K. Ormuž: Motorna vozila, predavanja, 2014-2015.
- [3] David Wafer.:Lateral Dynamics of Multiple Trailer Trucks in Windy Environments,2014.
- [4] J. Štivić.: Seminarski rad – Otpori vožnje i potrošnja goriva, FSB, 2015.
- [5] T. Schütz.: Hucho - Aerodynamik des Automobils Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, Springer vieweg,2013.
- [6] S. Beregi, D. Takács & G. Stépán.: The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Taylor & Francis Group, 2016.
- [7] I. Gazdek.: Utjecaj parametara vozila na ponašanje vozila u ispitnim procedurama vezanim za upravljivost, Diplomski rad, FSB, 2017.
- [8] [https://i.ytimg.com/vi/\\_RrhctXIJKU/hqdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/_RrhctXIJKU/hqdefault.jpg), datum pristupa 23.4.2018.
- [9] N. Zhang, G. Yin, T. Mi, X. Li, N. Chen.: Analysis of Dynamic stability of Cat-trailer Combinations with Nonlinear Damper Properties, Procedia Iutam, 2017.
- [10] <https://caravanandmotorhomebooks.com/need-for-a-wdh/>, datum pristupa 23.4.2018.
- [11] <http://www.thomson-caravans.co.uk/advice/chassis/caravanchassis.htm>, datum pristupa 24.4.2018.
- [12] <https://www.carry-ontrailer.com/trailers/cargo-trailers/>, datum pristupa 24.4.2018.
- [13] [https://www.intermetal.hr/hrvatski/homologirane-euro-auto-kuke\\_16/](https://www.intermetal.hr/hrvatski/homologirane-euro-auto-kuke_16/), datum pristupa 24.4.2018.
- [14] <http://www.thomson-caravans.co.uk/advice/maintenance/brakingoperation.htm>, datum pristupa 24.4.2018.
- [15] ISO 12021-2010 Sensitivity to lateral wind- Open loop test method using wind generator input, 2010
- [16] G. Šušteršič, M. Ambrož, I. Prebil.: Vehicle dynamics of cars with trailers, AREC, 2010
- [17] <https://www.caravanguard.co.uk/news/wp-content/uploads/2016/09/ALKO-ATC4-400x267.jpg>, datum pristupa 27.4.2018.
- [18] <https://mmpc.ph/wp-content/uploads/2016/02/Trailer-Stability-Assist.jpg>, datum pristupa, 27.4.2018.
- [19] <https://caravanandmotorhomebooks.com/wp-content/uploads/2014/09/Caravan-sway-out-of-phase-web-1024x329.jpg>, datum pristupa, 28.4.2018.
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=VIMxVzUnBSA>, datum pristupa 24.4.2018.
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=YpOTWjPmyCw>, datum pristupa 24.4.2018.

- [22] [https://www.youtube.com/watch?v=vrOz\\_NaqyfQ](https://www.youtube.com/watch?v=vrOz_NaqyfQ), datum pristupa 24.4.2018.
- [23] <http://www.trojanparts.com.au/index.asp?PageID=2145865803>, datum pristupa 30.5.2018.
- [24] K. Prebeg.: Utjecaj parametara vozila na podupravljivost / preupravljivost vozila, Diplomski rad, FSB, 2017.
- [25] <https://styleintech.com/fitur-trailer-stability-assist-tsa/>, datum pristupa 1.7. 2018.
- [26] <https://www.boeingtrailers.com.au/wp-content/blogs.dir/177/files/2015/11/sab-evo-all-new.jpg>, datum pristupa 1.7. 2018.
- [27] <https://caravanandmotorhomebooks.com/wp-content/uploads/2015/07/caravan-jack-knife-source-unknown.jpg>, datum pristupa 1.7.2018.
- [28] ISO 9815-2003 Road vehicles – Passenger-car and trailer combinations – Lateral stability test, 2003

**PRILOZI:**

- I. CD-R disc